

# Las galaxias

Cómo se estructura  
el universo



Un paseo por el  
**COSMOS**



EXLIBRIS Scan Digit



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoureu.blogspot.com/>

# Las galaxias

Cómo se estructura  
el universo

RBA



*Imagen de cubierta:* Composición realizada con datos obtenidos en distintas frecuencias por los observatorios ALMA y Hubble de las galaxias de las Antenas, un par de galaxias en colisión a decenas de millones de años-luz de la Vía Láctea.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Joel Gabàs Masip por el texto  
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.U.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Wikimedia Commons: 23c; ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), NASA/ESA Hubble Space Telescope: portada; Iztok Bončina/ESO: 36-37; Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA/SDO: 82; Antonio Ciccolella/M. De Leo/Joan Pejoan: 84-85; ESA/Colaboración Planck: 62; ESA/Hubble/Digitized Sky Survey 2/Davide De Martin: 111b; ESO/Yuri Beletsky: 109b; ESO/S. Brunier: 130-131; Andrew Fruchter (STScI) *et al.*, WFPC2, HST, NASA: 68-69; Fernando de Gorocica/Joan Pejoan: 92; Brocken Inaglory: 127; NASA, ESA, Hubble Heritage Team (STScI/AURA): 103b, 116-117; NASA, ESA, S. Beckwith (STScI), The Hubble Heritage Team (STScI/AURA): 115ai; NASA/ESA/A. Evans/Universidad de Virginia en Charlottesville/NRAO/Universidad de Stony Brook/Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Colaboración Hubble: 58-59; NASA/ESA/M. Livio & Hubble 20th Anniversary Team (STScI): 29ai, 29ad; NASA/Hubble Heritage Team (STScI/AURA): 115ad; NASA/JPL-Caltech/ESA/Instituto de Astrofísica de Andalucía/Universidad del País Vasco/JHU: 97; NASA/JPL-Caltech/R. Gehrz (Universidad de Minnesota): 105; NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC-Caltech)/Joan Pejoan: 126; NASA/JPL-Caltech/Joan Pejoan: 144; NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/UofA/ESA/AURA/JHU: 29c; NASA/STScI/WikiSky: 103a, 139; NASA/WMAP Science Team: 63; Observatorio Europeo Austral: 145; Pachango/Wikimedia Commons: 23ai; H. Raab/Wikimedia Commons: 23ad; Eckhard Slawik: 111a; Volker Springel *et al.*/Consorcio Virgo/Instituto Max Planck de Astrofísica: 57; Boris Štromar: 109a; Subaru, NAOJ, NASA/ESA/Hubble, R.W. Olsen, Federico Pelliccia, Rolf Wahl Olsen: 115c.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-9084-7

Depósito legal: B-16367-2017

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - Printed in Spain

## SUMARIO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	7	
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>La observación astronómica</b>	15
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>Las galaxias en el universo</b>	45
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>La tipología de las galaxias</b>	77
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>Nuestra galaxia: la Vía Láctea</b>	121
<b>LECTURAS RECOMENDADAS</b>		151
<b>ÍNDICE</b>		153



## INTRODUCCIÓN

////////////////////////////////////

El estudio de las galaxias es una disciplina relativamente reciente. De hecho, hasta principios del siglo xx se creía que todo el universo estaba incluido en la Vía Láctea. En este sentido, Edwin Hubble fue uno de los personajes más influyentes en el establecimiento del nuevo paradigma según el cual las estructuras espirales identificadas desde hacía décadas eran estructuras exteriores a nuestra galaxia y similares a ella. Aunque otros habían ya situado la galaxia de Andrómeda fuera de la Vía Láctea, Hubble fue capaz de determinar la distancia a diversas galaxias con suficiente precisión para certificar que eran mucho más lejanas que cualquier parte de la nuestra. Hubble observó también que la mayoría se alejan a velocidades proporcionales a su distancia en relación con nosotros y entre ellas. Las velocidades de las galaxias podían obtenerse mediante el análisis de su espectro electromagnético, teniendo en cuenta el efecto Doppler. Es decir, las galaxias emiten radiación electromagnética con distintas intensidades en cada frecuencia, formando unos patrones característicos. Estudiando si están desplazados hacia mayores o menores frecuencias, es posible averiguar a qué velocidad se mueve la galaxia respecto a noso-



tros, de forma análoga a cuando un sonido con una frecuencia mayor o menor nos indica si una ambulancia se acerca o aleja. En general, el espectro electromagnético de las galaxias presenta un desplazamiento hacia frecuencias menores, conocido como desplazamiento al rojo. Pues bien, Hubble observó que el desplazamiento era mayor cuanto más alejada estaba la galaxia, interpretando este fenómeno como una evidencia de que el universo se expande. Este descubrimiento es uno de los que impulsaron la teoría del Big Bang, según la cual el universo se está expandiendo a partir de algo parecido a una gran explosión inicial. En las últimas décadas se han recopilado gran cantidad de datos que indican que la expansión está incluso en fase de aceleración, aunque todavía no se ha encontrado una explicación satisfactoria a este fenómeno.

El camino hasta nuestra visión actual de un universo en expansión poblado de gran cantidad de galaxias ha requerido el esfuerzo de muchos. Ya en la antigua Grecia, Demócrito fue uno de los primeros en sugerir que la franja luminosa difusa en el cielo nocturno conocida como Vía Láctea podía estar formada por un conjunto de estrellas como las otras, pero más distantes. Sin embargo, para tener la certeza de este hecho hubo que esperar hasta principios del siglo xvii y a que Galileo lo demostrara mediante observaciones con su sencillo telescopio. Por aquel entonces, coincidiendo con la aparición de las teorías heliocéntricas unas décadas atrás, surgieron también las primeras hipótesis que relegaban al Sol a la categoría de una estrella igual que las demás. Poco después, Edmund Halley realizó otra aportación destacada cuando contrastó que algunas de las posiciones relativas de las estrellas habían cambiado respecto a las registradas en la antigua Grecia. Esto les daba un carácter individual en un espacio tridimensional, quitándoles definitivamente el estatus de fijas en una esfera celeste plana. Ya en el siglo xviii, Thomas Wright propuso que las estrellas de la Vía Láctea se mantenían unidas por fuerzas gravitatorias, rotando alrededor de un centro de masas. Wright también especuló que algunas de las manchas con aspecto nebuloso visibles en el cielo nocturno eran estructuras similares y exteriores a la Vía Láctea. El número de galaxias que

se habían observado hasta entonces era muy reducido, aunque algo mayor que el de las que se pueden ver sin instrumentos de observación. Las Nubes de Magallanes eran conocidas de forma ancestral en el hemisferio sur y la primera observación registrada de la galaxia de Andrómeda se debe al persa Abd Al-Rahman Al Sufi en el siglo x. El número de observaciones registradas empezó a aumentar con el desarrollo de los telescopios en el siglo xviii, aunque su naturaleza no se resolvió hasta el siglo xx.

Actualmente, las galaxias desempeñan un papel fundamental en el estudio del universo, ya que son consideradas sus mayores unidades estructurales. Esto no quiere decir que sean las estructuras más grandes, pues se pueden encontrar formando parte de cúmulos y supercúmulos, que además parecen estar unidos por filamentos gaseosos de baja densidad. A una escala mayor, no se ha podido detectar una estructura, ni asimetrías significativas, ni una dirección preferente. Uno de los temas cruciales en la configuración actual del universo es el origen y, sobre todo, la evolución de las galaxias, y una de las cosas más curiosas al respecto es que podemos ver en marcha fases antiguas de esa evolución, como si se tratase de una transmisión en diferido. Es decir, teniendo en cuenta la finitud de la velocidad de la luz y las enormes distancias astronómicas, los eventos que observamos en el universo pueden haber tenido lugar en un pasado muy lejano, o mejor dicho en un estadio de su evolución muy anterior. En este sentido, el universo observable presenta estadios menos evolucionados en los puntos más alejados de nosotros. Así, cuanto más lejos seamos capaces de ver, más primitivos serán los sucesos observados y más completa será nuestra idea global sobre la historia del universo. En cuanto a las configuraciones actuales de las galaxias, parece ser que han tenido mucha importancia las interacciones mutuas, que normalmente son el resultado de la fusión progresiva de galaxias menores. Sin embargo, los conocimientos que tenemos sobre cómo se originaron las primeras galaxias a partir del universo primitivo son aún escasos. Estos conocimientos van a mejorar enormemente cuando se observen los confines del universo con la próxima generación de telescopios.



Según las últimas estimaciones el universo observable contaría con aproximadamente un billón de galaxias. Teniendo en cuenta que la mayoría no han sido observadas nunca, podemos imaginar que es imposible darles nombres a todas. Se trata además de una estimación realizada a partir de la densidad evaluada tomando imágenes de muestra del espacio profundo con altísima exposición. Así que, muchas veces, para identificar una galaxia bastará con dar su posición en un sistema de referencia, aunque también existen catálogos donde podremos encontrar las más destacadas. Sea como sea, las galaxias conocidas han servido para establecer unas tipologías morfológicas. Uno de los pioneros en este sentido fue el mismo Edwin Hubble, cuyo sistema de clasificación establecido hace casi un siglo sigue vigente en la actualidad. Según este sistema las galaxias se pueden dividir en tres grandes grupos principales: las elípticas, las espirales y las espirales barradas. Por un lado, las galaxias elípticas se caracterizan por no contar con una estructura bien marcada, estando sus estrellas distribuidas formando un elipsoide. Su movimiento alrededor del centro se produce en todas las direcciones por igual, siendo el momento angular total insignificante. Normalmente cuentan con poco material interestelar, pocos cúmulos abiertos y un bajo ratio de formación estelar, por lo que su población de estrellas está relativamente envejecida. Por otro lado, las galaxias espirales y espirales barradas se caracterizan por tener una estructura bien definida en torno a un plano principal, en cuyas cercanías se concentran las estrellas formando un disco alrededor del centro galáctico. Su nombre les viene de los brazos en forma de espiral en los que se estructura este disco. Normalmente, cuentan con gran cantidad de material interestelar y cúmulos abiertos, así como un alto ratio de formación estelar, por lo que su población estelar es relativamente joven. Aparte de los tipos básicos, existen otras morfológicas intermedias y completamente irregulares.

Además de su morfolología básica, las galaxias se pueden asimismo describir y clasificar por su luminosidad, su tamaño o su número de estrellas. El número de estrellas de una galaxia puede oscilar desde unos pocos cientos de millones hasta cientos

de billones y la extensión desde centenares hasta millones de años-luz. Actualmente, las galaxias elípticas son las que abarcan una mayor variedad en número de estrellas y tamaños entre las conocidas. Van desde las enanas casi esféricas parecidas a los cúmulos globulares hasta las supergigantes que dominan los grandes cúmulos galácticos. Sin embargo, recientemente se han identificado galaxias espirales que pueden competir con las mayores elípticas. En cuanto a su luminosidad, las galaxias infrarrojas extremadamente luminosas ocupan el primer lugar. Su naturaleza parece ser más bien próxima a las espirales, aunque pueden llegar a liberar diez mil veces más energía que la Vía Láctea. Aparte de las características puramente morfológicas, existen otras como el ratio de formación estelar o la actividad de los núcleos. A partir de ellas se pueden definir otras tipologías no estrictamente morfológicas, como las galaxias con brote estelar o las galaxias con núcleo activo. Las galaxias con brote estelar se caracterizan por tener un ratio de formación estelar excepcionalmente alto. En ocasiones la formación estelar se produce a tal velocidad que consumiría el gas interestelar en decenas de millones de años, un corto periodo en comparación con la vida de la galaxia. Es por ello que este fenómeno se acostumbra a asociar a episodios puntuales entre galaxias que interactúan gravitatoriamente. Las galaxias con núcleo activo o simplemente galaxias activas se caracterizan por tener unas emisiones nucleares que representan una cantidad significativa del total de la radiación de la galaxia. Entre sus tipos más destacados encontramos los quásares, las galaxias Seifert y los blazares.

En cuanto a nuestra galaxia, se sabe que se trata de una espiral barrada con un núcleo de tamaño intermedio, brazos ligeramente separados y rodeada por una estructura anular poco definida. El núcleo parece que consiste en una estructura barrada con un agujero negro supermasivo central. En cuanto al resto del disco galáctico, dependiendo de dónde consideremos el límite exterior, su longitud estaría entre más de cien mil y casi doscientos mil años-luz. Desde nuestra posición interior, lo percibimos como una franja luminosa que divide la esfera celeste en dos hemisferios aproximadamente iguales. Nuestra visión está limi-



tada por los brazos espirales, especialmente ricos en el material interestelar a partir del cual se forman las estrellas. De hecho, si hemos podido estimar la forma y estructura de nuestra galaxia es en gran medida gracias a la observación de las otras. Nos encontramos concretamente en el límite de uno de estos brazos, siendo el Sol tan solo una estrella entre centenares de miles de millones más. Además del disco, la Vía Láctea cuenta también con un importante halo esferoidal de estrellas, gas caliente y materia oscura. Su densidad de gas frío es relativamente baja, por lo que apenas existe formación estelar, siendo su población estelar vieja en contraposición a la más joven del disco. Determinar la masa de todo este conjunto no es tarea sencilla, pudiendo las estimaciones oscilar desde cientos de miles de millones hasta billones de masas solares, dependiendo también de dónde consideremos el límite exterior. Nuestra galaxia cuenta además con una serie de galaxias satélites orbitando a su alrededor, algunas de las cuales están incluso siendo absorbidas.

Finalmente, una de las cuestiones más interesantes acerca del universo es si estamos solos o si realmente existen otras formas de vida. Según las últimas estimaciones, cada estrella de la Vía Láctea tendría una media de aproximadamente un planeta orbitando a su alrededor, de entre los cuales unos diez mil millones tendrían características similares a las de la Tierra. Parece pues poco probable que estemos solos en nuestra galaxia y por supuesto en el universo. Sin embargo, la dificultad de encontrar e interactuar con otras posibles formas de vida es muy elevada debido a las enormes distancias interestelares. Si bien las distancias dentro de nuestro entorno estelar inmediato se miden en años-luz, dentro de la Vía Láctea lo hacen en miles de años-luz y respecto a otras galaxias en millones. Si nos concentramos entonces tan solo en nuestro entorno inmediato, existen unas dos mil estrellas a tan solo cincuenta años-luz de nosotros. Sin embargo, la comunicación no resultaría nada sencilla en caso de poder contactar con una civilización en alguna de ellas. Por ejemplo, los posibles planetas actualmente identificados más cercanos y con características similares a la Tierra se encuentran en Tau Ceti, a unos 12 años-luz. Si se diera la enorme casualidad

de que existiera en alguno de ellos una civilización con la que pudiéramos llegar a comunicarnos pasarían veinticuatro años desde cada mensaje hasta su respuesta, y esto en una situación favorable. En cualquier caso, se están realizando esfuerzos para intentar detectar señales de vida extraterrestre. Diariamente se analizan los datos recogidos por grandes radiotelescopios en busca de pautas artificiales mediante superordenadores y computación distribuida en todo el mundo, aunque sin éxito hasta el momento. Si algún día llega a encontrarse alguna, significará sin duda un punto de inflexión en nuestra historia. La mejor manera de estar preparados es seguir mejorando nuestros conocimientos sobre el universo a través de sus estructuras básicas, como las galaxias.



# La observación astronómica

Vivimos una época extraña en la que disponemos de millones de imágenes sobre el universo moviendo apenas un dedo, pero nos resulta muy difícil encontrar la oportunidad de dirigir los ojos al cielo nocturno. Sin embargo, para comprender por completo los detalles, en ocasiones es necesario recuperar la visión global.



En la actualidad disponemos de mucha información sobre el universo y sus propiedades fundamentales. Para llegar a este punto se ha recorrido un largo camino dialéctico entre observaciones y aportaciones teóricas, entre las que destacan las teorías de la gravedad, las ondas electromagnéticas o la relatividad. Este conocimiento nos viene dado de forma perfectamente ordenada a través de diversos medios, desde la educación en las escuelas hasta páginas en internet. De hecho, la información que las personas corrientes obtenemos por observación directa es muy escasa. Más teniendo en cuenta que en el entorno urbano, donde vivimos la mayoría de nosotros, la contaminación lumínica apenas permite distinguir unas pocas estrellas en el cielo nocturno. Es una visión muy distinta de la que tenían los primeros seres humanos sobre la Tierra. Si queremos ver un cielo parecido al que vieron ellos tenemos que desplazarnos a zonas poco pobladas y sin contaminación lumínica. Desde allí, se pueden ver infinidad de estrellas y algunas galaxias, entre las que destaca un sector de la nuestra, la Vía Láctea, visible como una banda luminosa que atraviesa el cielo nocturno.

El universo visto desde la Tierra parece girar a nuestro alrededor debido al movimiento de rotación de nuestro planeta. Es



decir, las posiciones de los objetos astronómicos presentan un giro diario aparente alrededor del eje de rotación terrestre que viene marcado por la estrella Polar en el hemisferio norte y la estrella del Sur en el hemisferio sur. En el caso del Sol, la consecuencia más evidente son los ciclos día-noche. Si bien la posición del Sol, la Luna y los planetas presentan ligeras variaciones respecto al fondo galáctico-estelar, este último se mantiene relativamente inalterado en la escala de una vida humana. Por ello, para describir las posiciones de los objetos astronómicos se acostumbra usar sistemas de referencia definidos respecto al fondo galáctico-estelar más allá del sistema solar. Sin embargo, para facilitar las observaciones desde la Tierra existen también sistemas de referencia fijados al lugar de nuestro planeta desde donde se realizan.

Finalmente, en la investigación del universo se hace imprescindible la fácil identificación de los distintos objetos astronómicos. A tal efecto, disponemos de gran variedad de instrumentos. Para representar gráficamente sus posiciones, tenemos esferas o mapas celestes que nos indican en qué dirección debemos mirar para encontrarlos. Para facilitarnos la búsqueda, usamos las constelaciones, consistentes en figuras imaginarias que se forman uniendo estrellas a partir de las cuales se consideran distintas regiones que dividen el espacio. Para asegurarnos de que los identificamos correctamente, disponemos también de descripciones de sus propiedades, entre las que destaca la luminosidad aparente con la que se ven los objetos desde la Tierra. Toda esta información la podemos encontrar compilada en distintos catálogos, cada uno con su nomenclatura específica.

## MIRANDO AL CIELO DESDE NUESTROS ORÍGENES

La historia de la observación astronómica es probablemente tan antigua como el ser humano. En este sentido, muchos investigadores han relacionado monumentos prehistóricos circulares, como el de Stonehenge, con la observación del Sol, la Luna o las

estrellas. Aunque estas hipótesis son difícilmente demostrables, sin duda el ser humano tuvo conciencia desde sus orígenes de la regularidad del movimiento de los astros. Un primer hecho innegable es que la presencia del Sol marca el día y la noche. En el cielo diurno, la trayectoria solar permite la predicción de las estaciones. Cuando se acerca el invierno, esta es cada día más baja y corta, mientras que cuando se acerca el verano cada día es más alta y larga. En el cielo nocturno, el papel protagonista es para la Luna, pudiendo usarse sus fases de luz y sombra como referencia temporal intermedia entre los días y las estaciones. La correspondencia de estas observaciones con el movimiento de los astros y la toma de conciencia del lugar que ocupa la Tierra en el sistema solar han necesitado milenios. En la actualidad, sabemos que el día y la noche son consecuencia del giro que presentan los astros vistos desde nuestro planeta, causado por su movimiento de rotación sobre su propio eje. Las estaciones, por su parte, se deben a la inclinación de este eje que se mantiene constante a lo largo del movimiento de traslación terrestre alrededor del Sol. Las fases de la Luna corresponden al cambio de posición de nuestro satélite con respecto a la Tierra y el Sol, ya que orbita alrededor de nuestro planeta completando una vuelta aproximadamente cada cuatro semanas.

El modelo actual del sistema solar con la Tierra y los otros planetas orbitando alrededor del Sol fue formulado con precisión por Nicolás Copérnico en el siglo XVI. Si bien es cierto que existieron algunos precedentes de modelos heliocéntricos, los movimientos de los astros habían sido hasta entonces descritos como relativos a la Tierra e interpretados como tal. La aceptación del modelo de Copérnico no fue inmediata. Uno de los avances más destacados en esta aceptación lo debemos a las observaciones astronómicas de Galileo Galilei. Realizadas con un sencillo telescopio, sirvieron para demostrar que no todos los astros orbitaban alrededor de nuestro planeta. No solo encontró los cuatro satélites mayores de Júpiter, sino que también

La naturaleza utiliza la menor cantidad posible de todo.

JOHANNES KEPLER



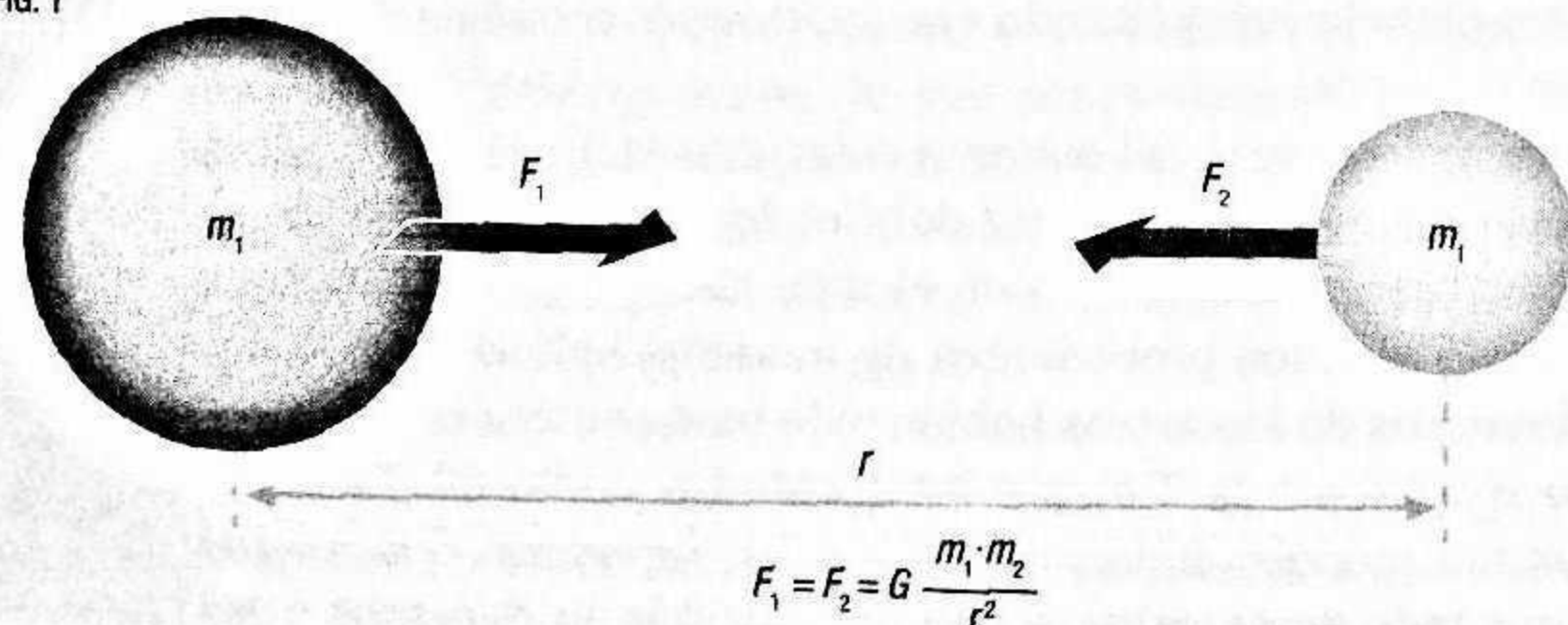
## LA GRAVEDAD DE NEWTON

Una de las ideas más importantes que permitieron a Newton la concreción de su teoría de la gravedad a finales del siglo *xvii* es la *inercia*. Este concepto, desarrollado ya por Galileo, consiste grosso modo en que un cuerpo mantiene su velocidad si no se realiza ninguna acción sobre él, de manera que si está en reposo permanecerá en reposo, y si se mueve con cierta velocidad, esta se mantendrá constante. Galileo describió la trayectoria de las balas lanzadas desde un cañón separando los componentes horizontal y vertical de su velocidad inicial. La componente horizontal no variaba, mientras que la vertical sufría una aceleración constante hacia la Tierra. Esta aceleración no dependía de la masa de los cuerpos, de tal forma que si lanzáramos una pluma y una bala desde la misma altura en ausencia de aire, tardarían lo mismo en llegar al suelo.

### La ley de la gravitación universal

Todas estas ideas fueron recogidas por Newton, llegando a la conclusión de que la fuerza que atraía a los cuerpos hacia la superficie terrestre era también la responsable de mantener a la Luna girando alrededor de la Tierra sin permitir que se escapase. Newton definió la fuerza de atracción gravitatoria entre dos cuerpos cualesquiera (figura 1) como proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Esta proporcionalidad se convertía en igualdad aplicando la *constante de gravitación universal* ( $G$ ), cuyo valor actual se halla en los  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ . La fuerza de atracción que la Tierra produce sobre los cuerpos en su superficie es su peso ( $F_g$ ). Del mismo modo, estos cuerpos atraen a la Tierra con la misma fuerza de atracción ( $F_g$ ). Son los cuerpos los que caen al suelo y no la Tierra hacia ellos, ya que la aceleración que le causan es imperceptible al ser su masa mucho mayor ( $m_1 \gg m_2$ ). Del mismo modo, son los planetas los que orbitan alrededor del Sol (figura 2). Si bien la ley de la gravitación universal dio el marco teórico para la interpretación de los movimientos planetarios

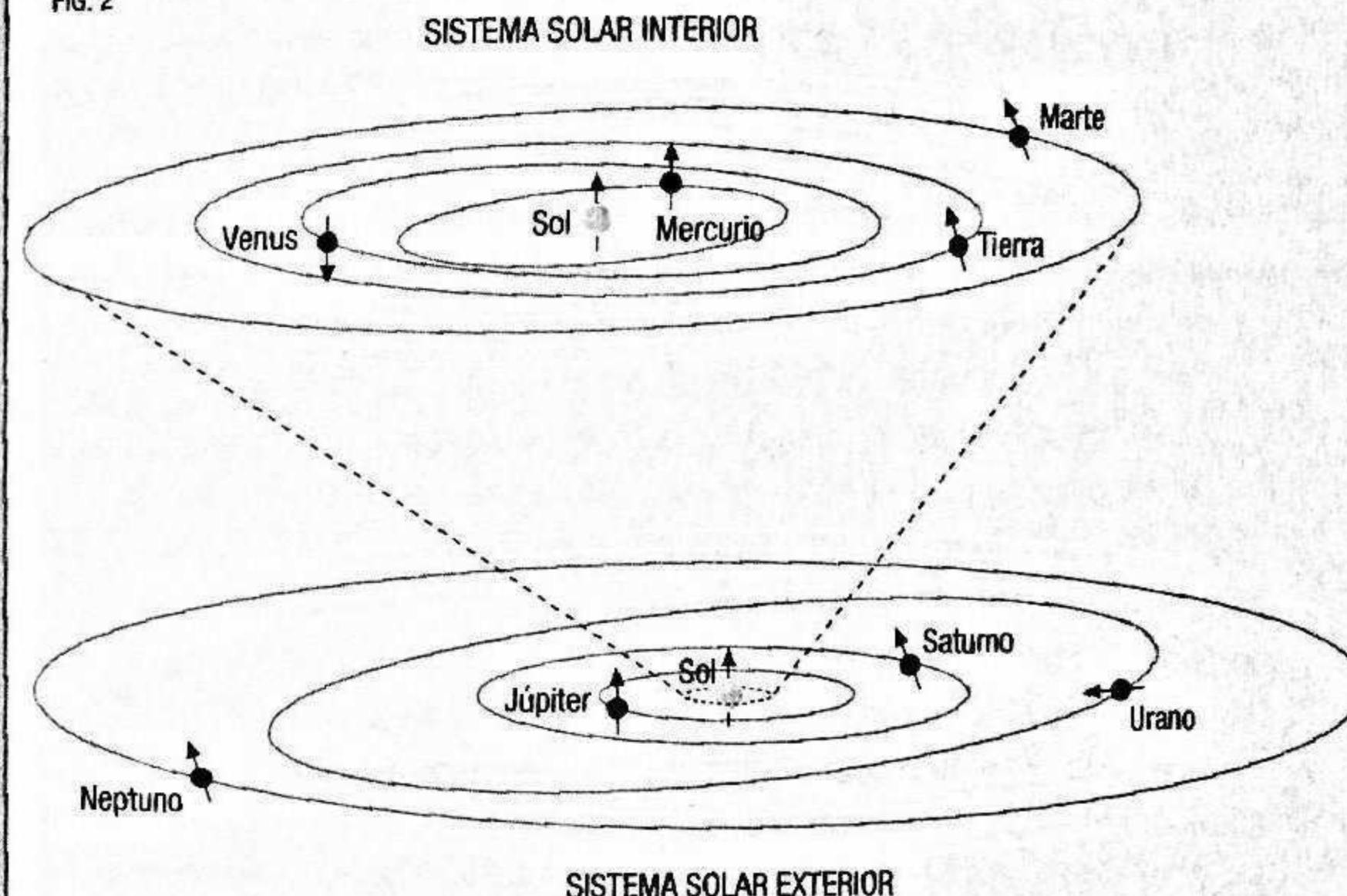
FIG. 1



Esquema que muestra la fórmula de la fuerza  $F_1$  ( $F_2$ ) existente entre dos cuerpos con masas  $m_1$  y  $m_2$  separados por una distancia  $r$ , según la ley de la gravitación universal de Newton.

alrededor del Sol, la secuencia temporal fue más bien inversa, ya que Newton la dedujo de las leyes del movimiento planetario de Kepler. Este último había dotado de rigor matemático la teoría de Copérnico considerando órbitas elípticas para los planetas en lugar de circulares. Cuando Newton formuló su ley ya se tenían estimaciones aceptables de las distancias astronómicas. A partir de entonces se pudieron calcular también las masas relativas de los astros. Para las masas absolutas hubo que esperar al siglo *xviii*, a que Henry Cavendish relacionara la masa de la Tierra con la de los cuerpos sobre ella mediante precisas mediciones con una balanza de torsión, permitiendo así determinar la constante de gravitación universal ( $G$ ). La ley de Newton vale para cuerpos cuya velocidad no se aproxima a la de la luz y no fue mejorada hasta el siglo *xx* con la teoría de la relatividad general de Einstein.

FIG. 2



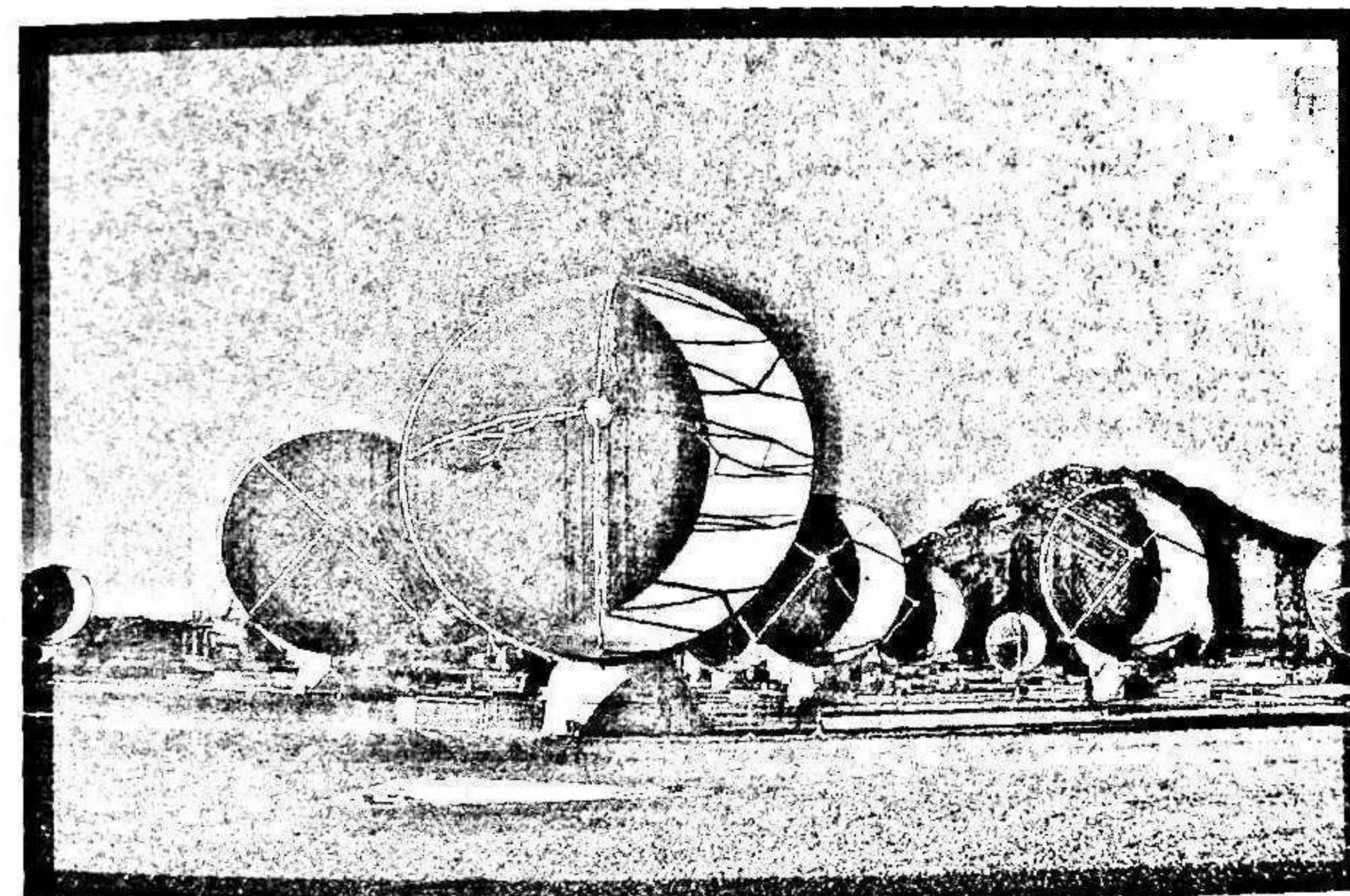
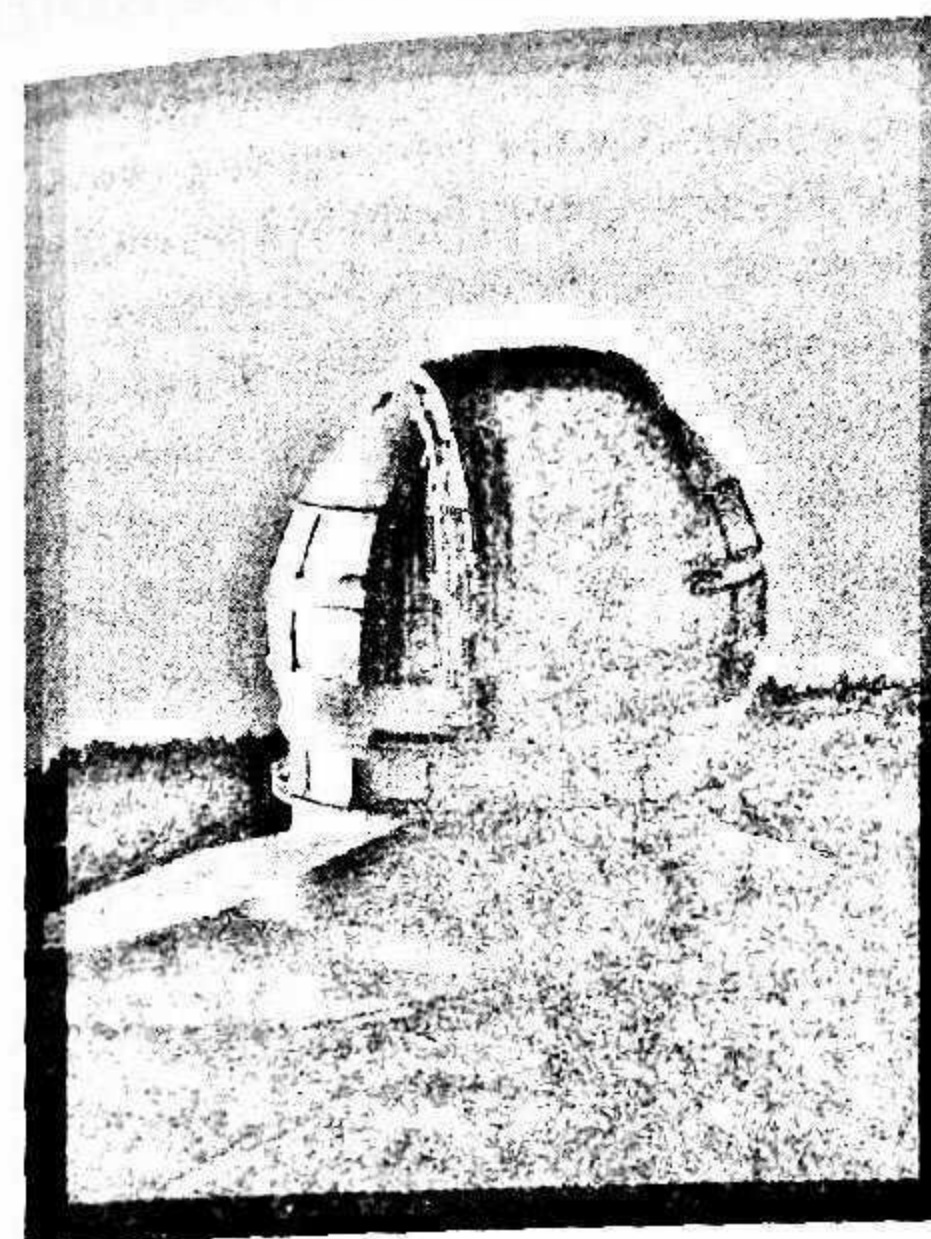
Esquema del modelo actual del sistema solar con los planetas orbitando alrededor del Sol. Urano y Neptuno se descubrieron en los siglos posteriores al establecimiento de la ley de la gravitación universal. Para cada astro se indica además su eje de rotación. La punta de flecha en cada eje indica el mismo polo y ello se relaciona con la dirección del giro en la rotación. Por ejemplo, la flecha del eje de Venus apuntando hacia abajo denota que su sentido de rotación es opuesto al de la Tierra y otros planetas. La flecha de Urano indica que este planeta está esencialmente «tumbado de lado» y «rueda» sobre su trazado orbital.



demostró que Venus orbitaba alrededor del Sol al descubrir sus fases de luz y sombra. El impulso definitivo al modelo de Copérnico vino de la mano de Isaac Newton y su teoría de la gravedad, según la cual eran los planetas los que se movían y no el Sol por ser este mucho más masivo. El telescopio usado por Galileo (*refractor*) tenía las lentes, objetivo y ocular, alineadas. El primer telescopio *reflector* del que se tiene constancia fue construido por Newton e incorporaba un pequeño espejo para dirigir la luz al ocular situado en el lateral del telescopio. Actualmente casi todos los grandes telescopios ópticos son reflectores, con materiales y formas que se han ido perfeccionando con el tiempo.

### DESDE MAXWELL EN ADELANTE

Uno de los hitos más importantes en la historia de la observación astronómica tuvo lugar en la segunda mitad del siglo XIX cuando James Clerk Maxwell formuló su teoría según la cual la luz es una onda electromagnética. Unas cuantas décadas más tarde, a mediados del siglo XX, empezaron a usarse los radiotelescopios, que captan otras ondas electromagnéticas con frecuencias distintas a las de la luz visible. Actualmente contamos con una amplia red de observatorios que acostumbran a situarse en lugares a cierta altura y poco poblados, para minimizar las interferencias atmosféricas y lumínicas. A día de hoy, el mayor telescopio óptico se encuentra en el Observatorio del Roque de los Muchachos en las islas Canarias (véanse las imágenes superiores de la página siguiente). Para compensar el histórico déficit de telescopios en el hemisferio sur, el ESO (*European Southern Observatory*) ha construido algunos de los más avanzados, como el VLT o el ALMA, en el desierto de Atacama en Chile. El VLT (*Very Large Telescope*) consiste en un sistema con cuatro de los mayores telescopios del mundo que además pueden operar conjuntamente. El ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) consta de decenas de radiotelescopios que realizan también operaciones conjuntas (véase la imagen inferior de la página contigua).



Arriba, imágenes del exterior y del interior de un telescopio del Observatorio del Roque de los Muchachos en las islas Canarias. Abajo, imagen del conjunto de radiotelescopios ALMA en el desierto de Atacama.



Otro hito reciente en la observación astronómica fue la puesta en órbita terrestre de telescopios espaciales para eliminar los efectos distorsionadores de la atmósfera. Uno de los más conocidos es el Hubble, colocado en órbita en 1990. Sensible a la radiación visible, ultravioleta e infrarroja, es capaz de captar por ejemplo el nacimiento de estrellas a partir de una nube molecular. En 1991 le siguió el Compton, sensible a la radiación gamma y a algunas frecuencias de rayos X, pero quedó inoperativo al fallar su sistema de dirección y se forzó su destrucción por incineración en la atmósfera. En 1999 y 2003 fueron puestos en órbita el Chandra y el Spitzer: el primero se centra en las frecuencias de los rayos X y el segundo en la radiación infrarroja. En conjunto, constituyen el programa de grandes observatorios de la NASA (la agencia espacial estadounidense). Muchos fenómenos astronómicos tan solo pueden estudiarse en profundidad gracias a una combinación de datos recopilados por observatorios espaciales y terrestres en distintas frecuencias. Las posibilidades de comprensión del universo que nos ofrecen todos estos observatorios nada tienen que ver con las que estaban al alcance de los primeros humanos. Lo que para ellos era una simple mancha borrosa para nosotros se puede convertir en una imagen de gran precisión de cómo nacen las estrellas. Y de igual modo, la simplicidad que se le atribuía al universo, con objetos nunca menores que el más pequeño visible a ojo desnudo, y nunca más grandes que una montaña, dejaron paso poco a poco a un universo de contrastes cada vez mayores, que extendía el límite de lo más minúsculo hasta la pequeñez casi infinitesimal de las partículas subatómicas y ensanchaba el cosmos hasta mucho más allá de nuestra galaxia, con la noción, antes impensable, de que muchas supuestas «nebulosas» de nuestra galaxia eran en realidad galaxias situadas fuera de ella y con sus propios astros. Hoy la ciencia conoce la escala completa de tamaños del universo (véase la imagen de las páginas siguientes), aunque los tamaños más extremos, tanto por diminutos como por gigantescos, siguen causando fascinación.

Finalmente, en las últimas décadas se han puesto en marcha también muchas otras misiones espaciales de observación aplicando multitud de nuevas técnicas con fines específicos, como el estudio del origen de nuestro universo o el campo magnético intergaláctico. Por un lado, las sondas WMAP de la NASA y Planck de la ESA (Agencia Espacial Europea) fueron enviadas a orbitar alrededor del Sol más allá de la órbita terrestre, en un punto tal que permitiese que se mantuvieran estacionarias respecto a nuestro planeta. Equipadas ambas con sensores de gran precisión, recopilan datos sobre la *radiación de fondo de microondas* para comprobar las teorías sobre el origen de nuestro universo. Por otro lado, la nave IBEX fue puesta en órbita terrestre por la NASA para el estudio de la transición entre la zona de influencia del campo magnético solar e interestelar. Con este mismo objetivo se añadió la instrumentación necesaria a la misión Cassini de la NASA, cuyo principal objetivo ha sido el estudio del sistema de satélites de Saturno. Más recientemente, la NASA ha enviado la nave WISE a la órbita terrestre y la Kepler a una órbita solar. La primera cartografía todo el espacio en varias frecuencias infrarrojas y, además de descubrir decenas de miles de asteroides en el sistema solar, nos ha dejado asimismo imágenes de una resolución impresionante de la Vía Láctea y del universo en general. La segunda buscó planetas extrasolares durante los cuatro años en que estuvo operativa y, gracias a los datos que recopiló, permitió estimar que en la Vía Láctea hay miles de millones de planetas similares al nuestro.

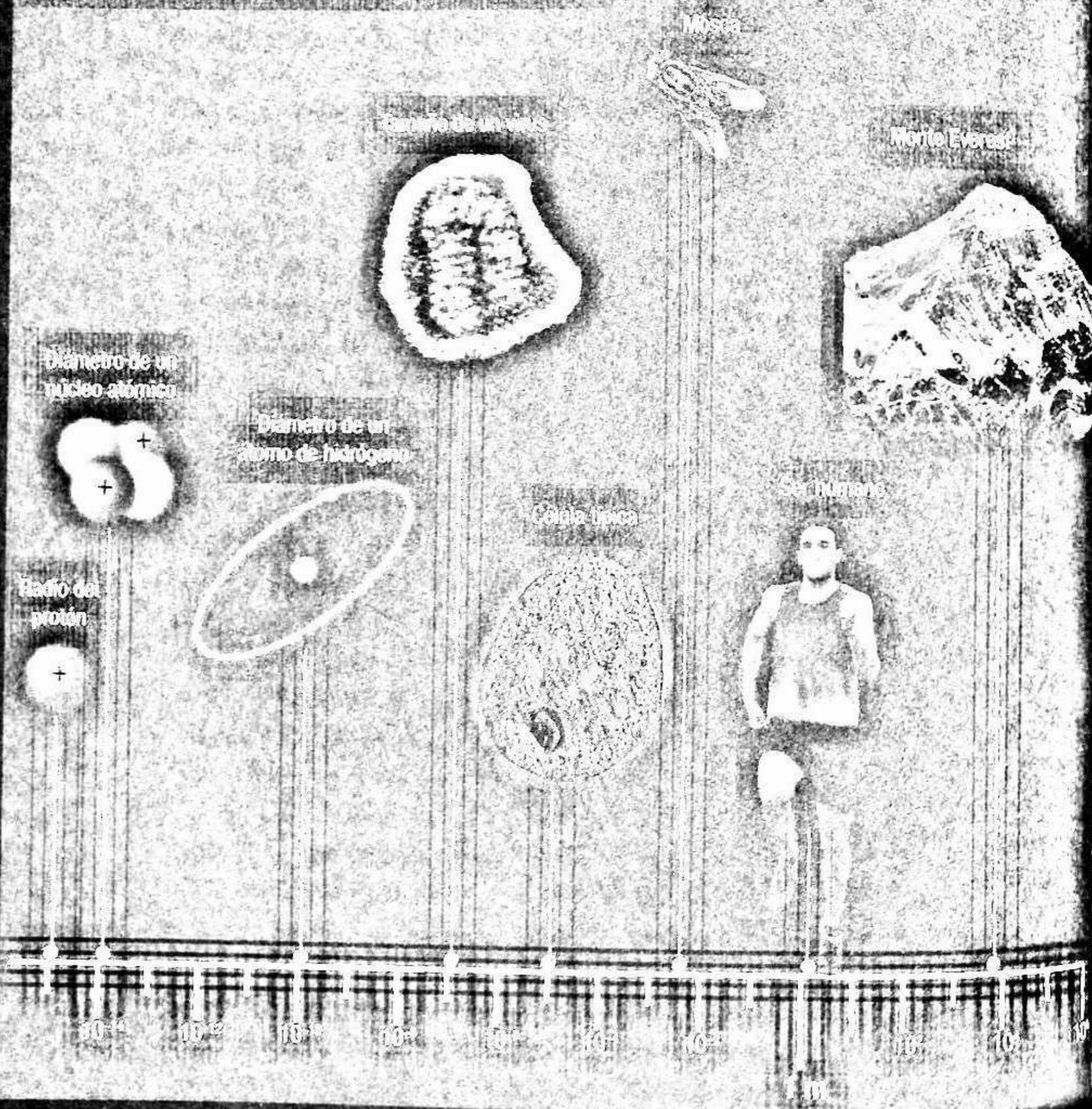
## POSICIONES RELATIVAS DESDE LA TIERRA

A lo largo de un día todos los cuerpos celestes presentan un giro aparente alrededor de un punto: la estrella Polar si estamos en el hemisferio norte y la estrella del Sur si estamos en el hemisferio sur. Este giro aparente está provocado por la rotación de la Tierra sobre su propio eje y es el causante de los ciclos día-noche. Los dos puntos celestes que aparecen inmóviles en el centro del giro

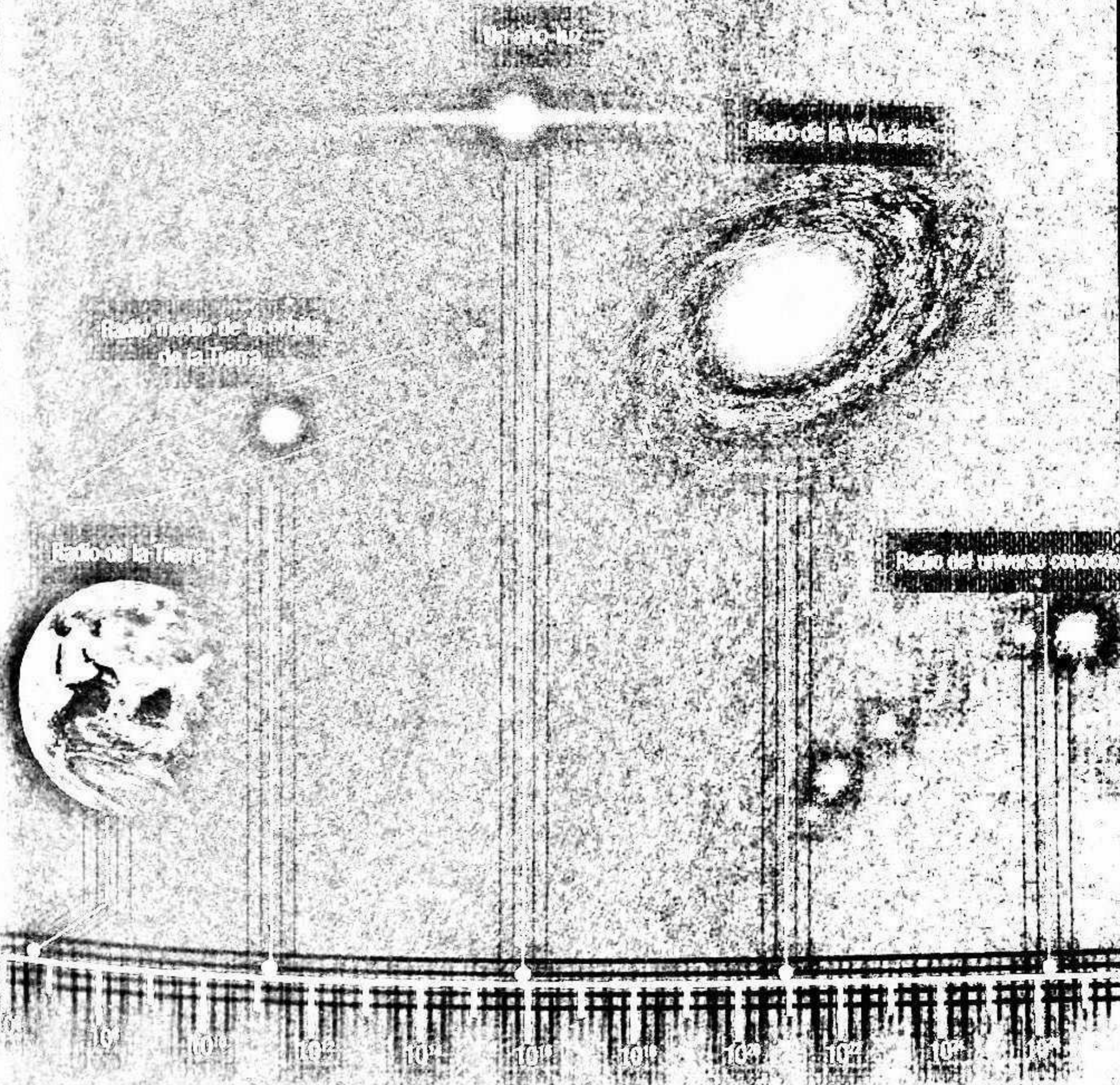


## LA ENORMIDAD DE LAS GALAXIAS

Los tamaños de las cosas marcan nuestra vida cotidiana. Pero la escala que manejamos habitualmente es solo una pequeña parte de la escala de tamaños de todo lo que existe. Únicamente el avance de la ciencia logrado con la invención del telescopio y la del microscopio nos abrió los ojos a los humanos acerca de la existencia de cosas tan pequeñas que escapan a nuestra percepción natural, o tan inmensas que su



tamaño aparente a una distancia "colosal" lo interpretábamos como el de objetos cercanos con tamaños modestos. En la imagen se muestran, en ordenes de magnitud y expresadas en metros, las longitudes de algunos de estos objetos, microscópicos o gigantescos, así como las de algunos con los que estamos familiarizados en nuestra vida cotidiana, a modo de comparación.





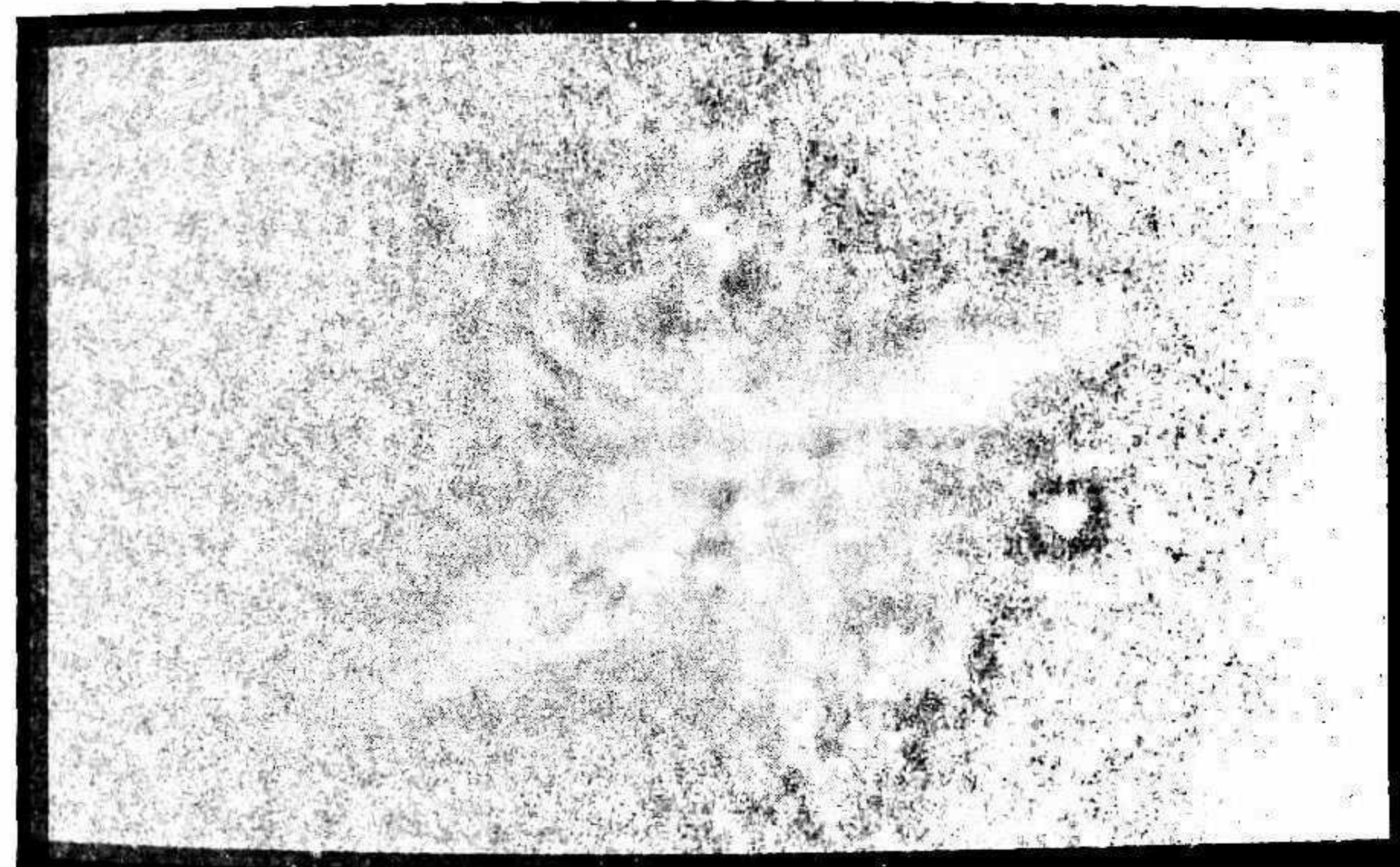
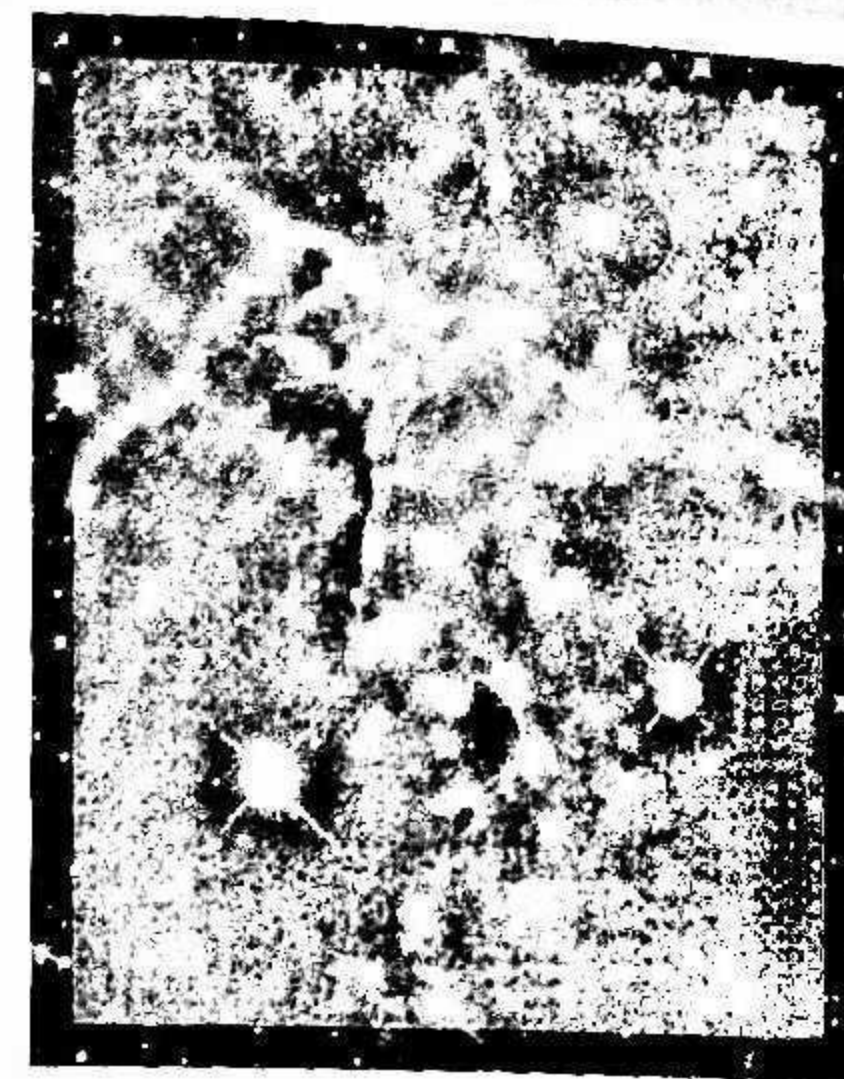
coinciden con la dirección del eje de rotación terrestre y se han usado históricamente como referencia espacial en la superficie de nuestro planeta (norte y sur). Dejando a un lado el giro diario, las posiciones relativas de las galaxias y estrellas se mantienen prácticamente constantes a lo largo del año, mientras que las del

¿Quiénes somos? Resulta que vivimos en un planeta insignificante de una estrella corriente perdida en una galaxia escondida en alguna esquina olvidada del universo, en el que existen muchas más galaxias que personas.

CARL SAGAN

Sol, la Luna y los planetas presentan variaciones. La posición solar sobre el fondo galáctico-estelar, por ejemplo, es la opuesta en verano respecto al invierno debido al movimiento orbital terrestre. Las posiciones relativas del Sol a lo largo de un año corresponden a un haz de líneas que definen el plano de la órbita terrestre. La línea que dibujan sobre el fondo galáctico-estelar es conocida como *eclíptica*, ya que los eclipses solo pueden darse cuando la Luna está sobre ella, lo cual no ocurre siempre por estar los planos orbitales lunar y terrestre ligeramente inclinados. Los planos orbitales del resto de los planetas tan solo presentan ligeras inclinaciones respecto al terrestre, por lo que siempre se visualizan en torno a la eclíptica. Para identificar la eclíptica sobre el fondo estelar se han usado históricamente las famosas constelaciones del zodiaco. Su inclinación vista desde la Tierra presenta una oscilación diaria, ya que el eje de rotación de nuestro planeta está inclinado unos  $23,4^\circ$  respecto a la perpendicular de su plano orbital.

Para la descripción de las posiciones relativas de los distintos objetos astronómicos se necesita un sistema de referencia. A diferencia de lo que ocurre con las posiciones de los cuerpos en los dominios gravitatorios terrestres, para las posiciones de los objetos astronómicos situados más allá es interesante que los sistemas de referencia no estén sujetos a los movimientos de nuestro planeta. En el caso de los cuerpos sobre la superficie de la Tierra u orbitando en sus proximidades, se usa un sistema de referencia anclado en ella basado en la latitud, longitud y altitud. En el caso de los objetos astronómicos, los sistemas de referen-



Arriba, imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble en las que se muestra el nacimiento de estrellas a partir de una nube molecular en la región conocida como Mystic Mountain de la nebulosa de la Quilla, también conocida como nebulosa de Carina. La imagen izquierda corresponde a la radiación de frecuencia visible o luz y la derecha a la radiación de frecuencia infrarroja. Abajo, la galaxia M82 en una imagen obtenida combinando observaciones en luz visible, infrarroja y rayos X. En la zona central de esta galaxia se han formado muchas estrellas al mismo tiempo. Esta tasa anormalmente alta de formación de estrellas parece deberse a la interacción sufrida por M82 con otra galaxia.



cia se definen respecto al espacio inercial, *grosso modo* el fondo galáctico-estelar más allá del sistema solar. En este sentido, existen sistemas de referencia inerciales que definen sus ejes usando el propio eje de rotación terrestre y la intersección de su plano perpendicular o ecuatorial con el plano orbital terrestre. Ambas direcciones están relacionadas con la Tierra, pero señalan a puntos fijos en el fondo galáctico-estelar. El eje de rotación de la Tierra tomado como positivo en dirección norte señala a la estrella Polar. Para el eje de la línea de intersección entre los planos ecuatorial y orbital terrestres se considera positivo el sentido hacia el Sol en el equinoccio de primavera, conocido como *equinoccio vernal* (20-21 de marzo). En el sentido positivo, la línea del equinoccio vernal se pierde en el espacio en un punto conocido como *punto vernal* o *punto de Aries*. El motivo de este nombre es que al ser inicialmente calculado hace unos dos milenios se encontraba tras la constelación de Aries, aunque actualmente se halla tras la constelación de Piscis. Este desplazamiento es debido a que el eje de rotación terrestre, que determina el plano ecuatorial y por tanto la línea del equinoccio vernal, sufre variaciones a lo largo del tiempo. Para empezar, su dirección cambia lentamente manteniendo más o menos el ángulo con el plano orbital terrestre y completando un cono en un periodo de casi 26 000 años. Esto da un avance o *precesión* del punto de Aries de un grado cada 72 años aproximadamente. El eje de rotación tiene también una pequeña oscilación conocida como *nutación*, cuyo periodo es de casi 19 años y da desviaciones de hasta 17 segundos de grado. Estos movimientos hacen necesario tener que escoger una fecha concreta para fijar los ejes. Uno de los sistemas de referencia más usados es el J2000, que toma las 12:00 TT (tiempo terrestre) del 1 de enero del año 2000.

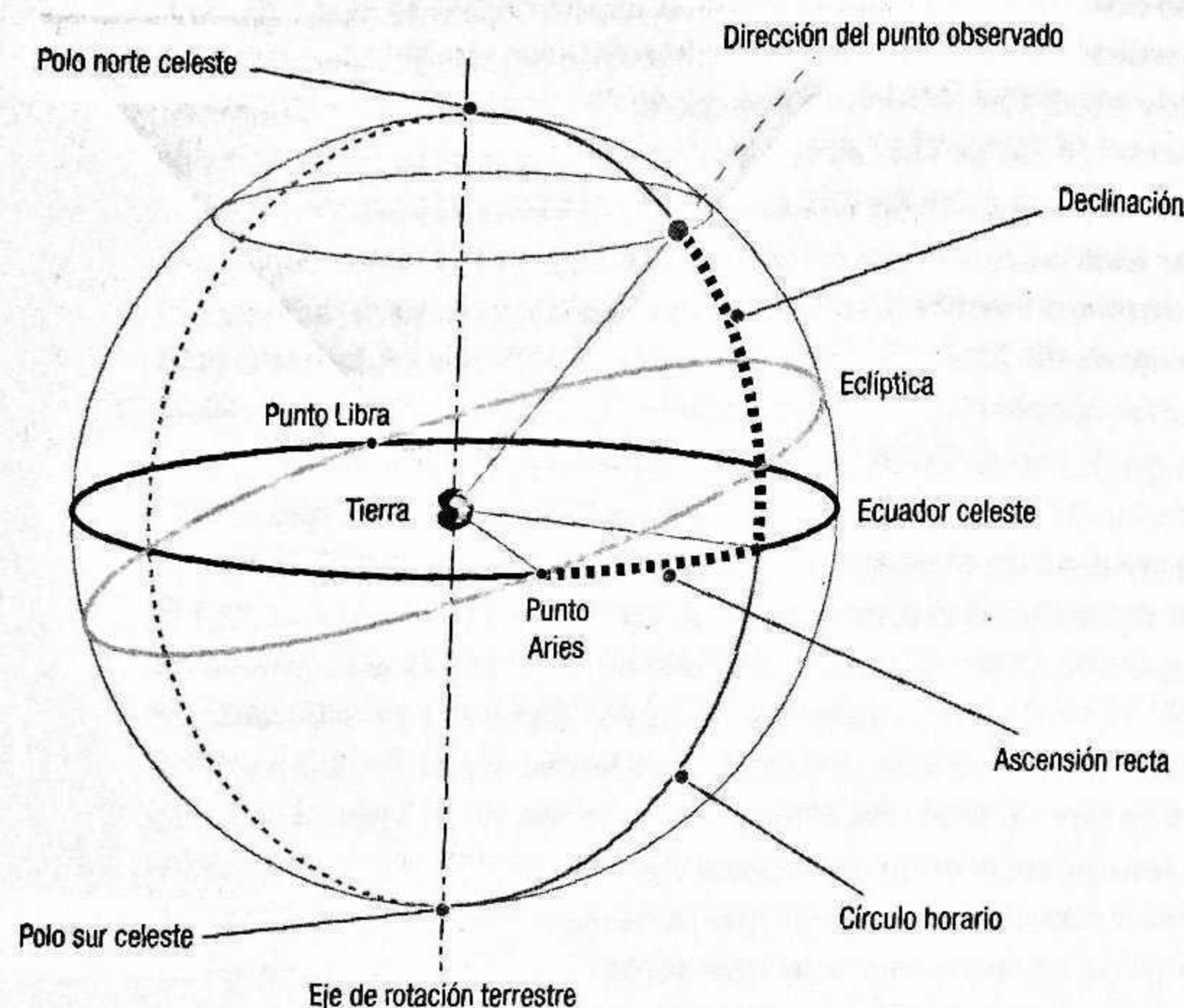
Fijar un sistema de referencia al espacio inercial tiene más dificultades de lo que pueda parecer ya que el fondo galáctico-estelar no es inmutable. Las estrellas de la Vía Láctea presentan un movimiento relativo entre ellas y respecto al fondo galáctico, aunque tan solo se puede apreciar en largos periodos de tiempo. Este fenómeno no fue descubierto hasta el siglo XVIII, cuando Edmund Halley detectó que algunas estrellas habían cambiado

ligeramente su posición respecto a las descritas en la antigua Grecia. Estas variaciones no habían sido detectadas antes, ya que no alteran significativamente el aspecto celeste y se requieren mediciones precisas suficientemente separadas en el tiempo. Hoy en día se sabe que una parte del movimiento es debido a la rotación de la Vía Láctea y otra parte al movimiento propio de cada estrella. En la definición del sistema de referencia estándar más usado en la actualidad, el *sistema de referencia celeste internacional* (ICRS, según sus siglas en inglés), se usaron centenares de fuentes de radio de otras galaxias. Adoptado por la Unión Astronómica Internacional (UAI, o IAU, por sus siglas en inglés), fue definido para coincidir casi exactamente con el J2000. De hecho, todos los datos referenciados al sistema J2000 en el sistema de procesamiento de información estándar de la NASA están en realidad referenciados al sistema ICRS.

Especificar la posición de distintos objetos astronómicos en un sistema de referencia requiere también un sistema de coordenadas. En los sistemas fijados al espacio inercial se acostumbra a usar coordenadas polares de forma similar al funcionamiento de los sistemas fijados a la Tierra. Es decir, se da el ángulo de *declinación* que sería equivalente a la latitud y el ángulo de *ascensión recta* que sería equivalente a la longitud. Como se muestra en la figura 1, una declinación define un cono de posiciones espaciales, igual que el definido por las posiciones cenitales en la latitud correspondiente. Para definir una dirección particular en el cono de una declinación se necesita el ángulo de ascensión recta. A diferencia de la longitud cuyo origen viene marcado históricamente por un punto en la Tierra (Greenwich), el origen de la ascensión recta viene determinado por una dirección en el espacio inercial (punto de Aries). La declinación se mide en grados tomando como origen el ecuador celeste, de tal forma que un punto en el ecuador, polo norte o polo sur celeste tiene una declinación de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  o  $-90^\circ$ , respectivamente. La ascensión recta se mide en horas desde  $0^h$  hasta  $24^h$  tomando como origen el punto de Aries. Tanto grados como horas se subdividen en 60 minutos y estos a su vez en 60 segundos, por lo que hay que especificar si se trata de minutos



FIG. 1



Esquema del sistema de coordenadas polares basadas en la declinación y la ascensión recta sobre una esfera celeste. Vistos desde la Tierra los cuerpos del sistema solar aparecen siempre en torno de la eclíptica, la línea que marca el plano de la órbita terrestre. El ecuador celeste viene determinado según el eje de rotación terrestre, que se dibuja aquí en vertical para una representación más clara del sistema de coordenadas. La intersección entre plano ecuatorial celeste y eclíptica determina el punto de Aries, origen de coordenadas de la ascensión recta.

(') y segundos (") de grado (°) o minutos (') y segundos (s) de hora (h). Las líneas formadas por aquellos puntos con la misma declinación se conocen como *paralelos celestes* y las formadas por aquellos con la misma ascensión recta como *meridianos celestes*. Declinación y ascensión recta marcan la dirección en la que hay que observar para ver el objeto. La tercera coordenada que definiría la posición del objeto es su distancia a la Tierra. Existen también otros sistemas de referencia y coor-

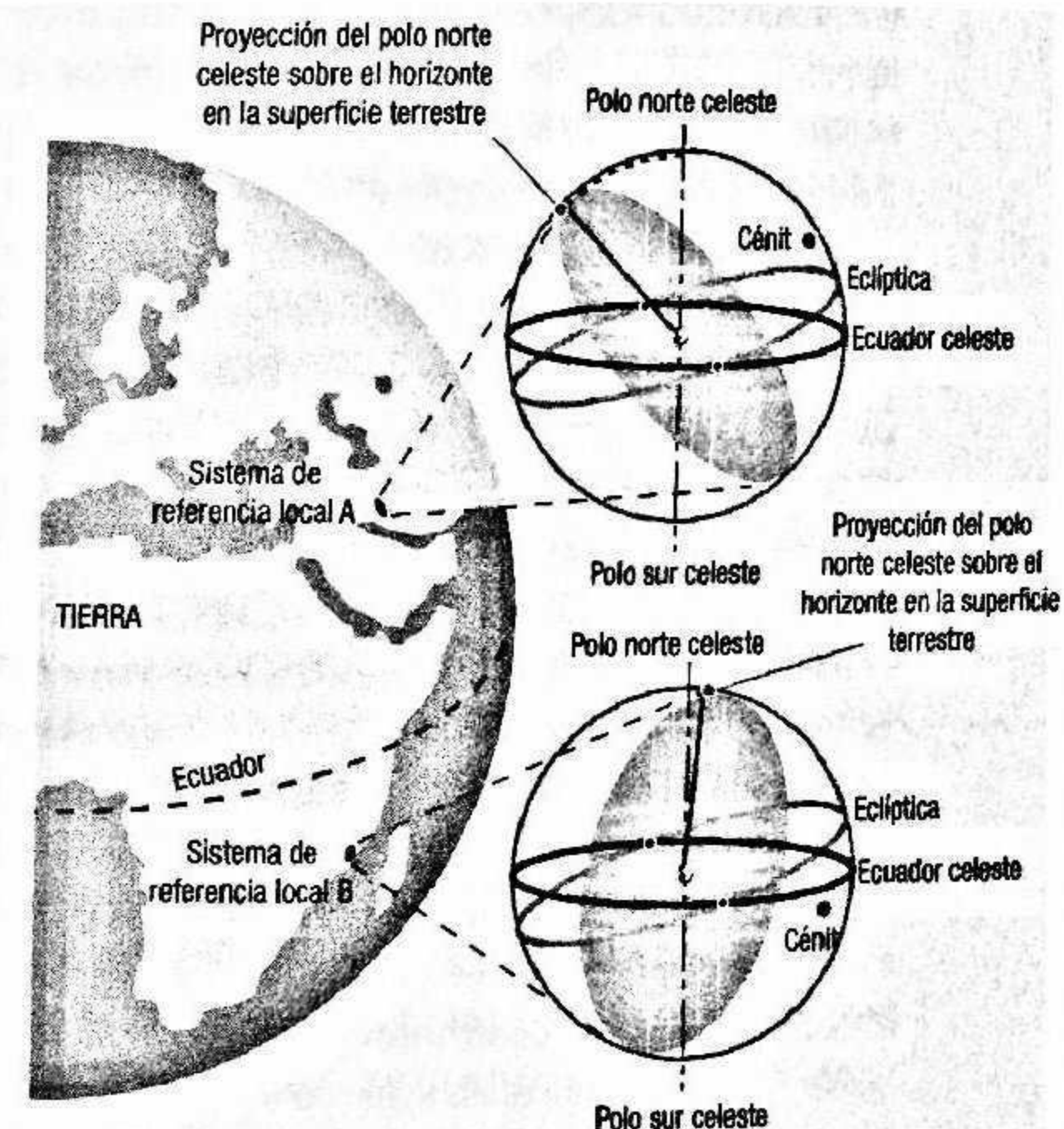
## SISTEMAS DE REFERENCIA LOCALES

La dirección vertical marcada por la gravedad varía según el tiempo y el punto de la superficie en que nos encontremos. Las posiciones de un mismo objeto astronómico referidas al horizonte local, plano perpendicular a la línea vertical, y al cénit, proyección de la línea vertical en el cielo, tienen distinto valor según en qué tiempo y lugar son tomadas.

### Sistema de coordenadas locales

Para ver un objeto astronómico en un sistema local se usan coordenadas polares: la elevación o altura y el acimut. La elevación es el ángulo entre el objeto y el horizonte local del observador. El acimut es el ángulo entre la proyección del objeto en el horizonte local y el norte. Las coordenadas de los objetos cambian a lo largo de un día debido a la rotación de la Tierra. Si el acimut está entre 0° y 180° entonces el objeto está ascendiendo, y si está entre 180° y 360° está descendiendo. Los objetos alcanzan su elevación máxima cuando se encuentran a 0° o 180° de acimut. En los polos, la elevación de los objetos es constante y el acimut queda indefinido ya que en sus horizontes locales la dirección norte no se puede definir.

Comparación entre dos sistemas de referencia locales en un instante concreto en dos puntos (A y B) de la superficie terrestre. Desde el A, en una latitud intermedia boreal, siempre se ve al Sol alcanzar su máxima elevación diaria al sur del cénit. Desde el B, en una latitud tropical austral, se ve al Sol alcanzar su máxima elevación diaria al norte del cénit en otoño-invierno y parte de primavera-verano. El resto de primavera-verano, el punto de más elevación está al sur del cénit.





denadas, por ejemplo los locales, que usan como referencia el horizonte en el punto de la superficie terrestre desde el que se realiza la observación.

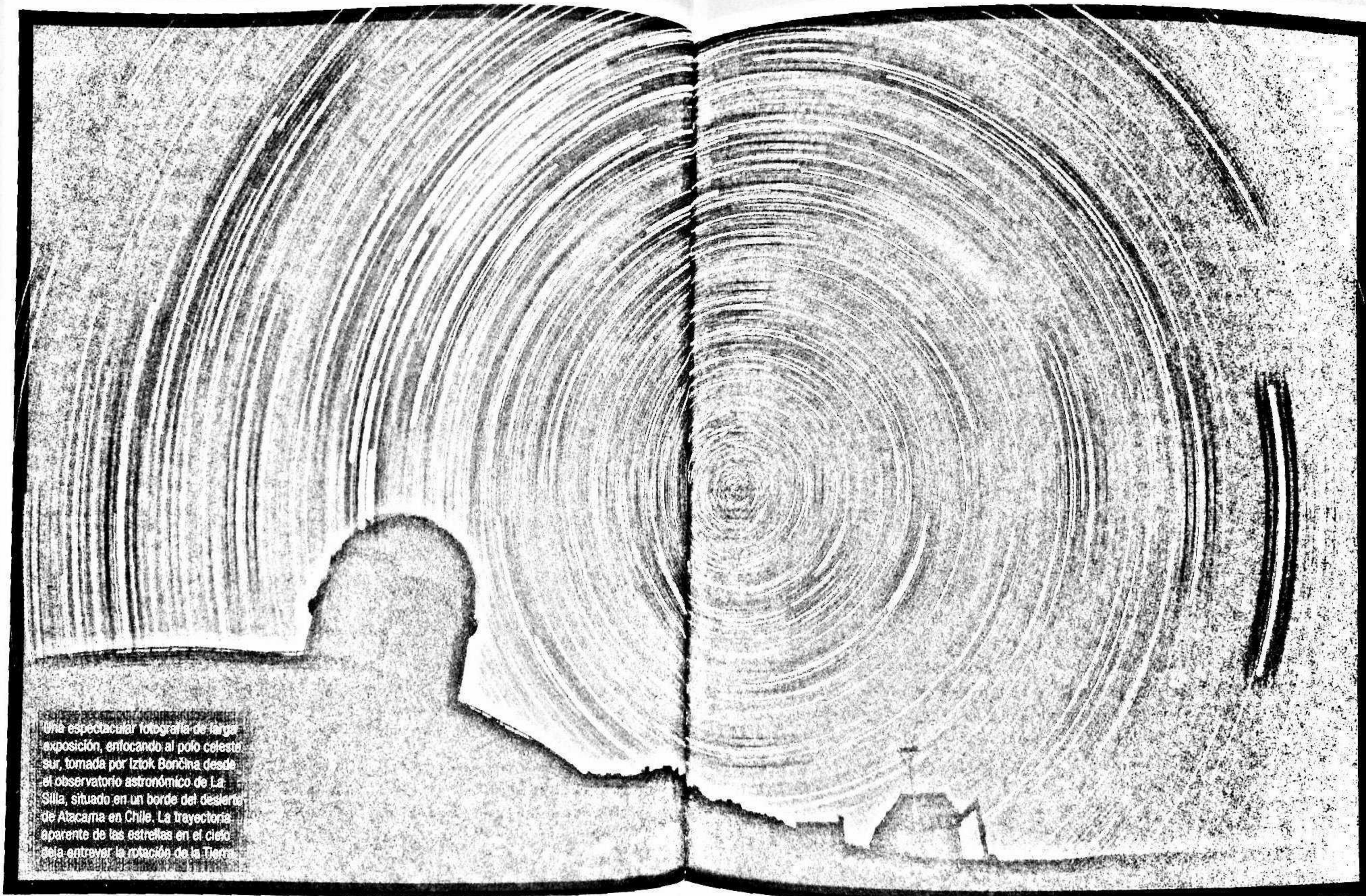
La dirección en la que se pueden observar las distintas galaxias y estrellas desde la Tierra se puede describir con bastante precisión. No ocurre lo mismo con las distancias a las que se encuentran. Existen varios métodos para determinar estas distancias dependiendo de su valor y del objeto astronómico. Para las estrellas u otros cuerpos de la Vía Láctea, se puede usar el método de la *paralaje*. La paralaje anual de una estrella es la pequeña variación anual en su posición relativa debida al cambio de perspectiva que supone el movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Existe incluso una medida de distancia astronómica definida con arreglo a este fenómeno: el *pársec*, equivalente a 3,26 años-luz (distancia que recorre la luz en un año),  $2,1 \cdot 10^5$  unidades astronómicas (1 unidad astronómica es la distancia media aproximada Sol-Tierra) o  $3,1 \cdot 10^{16}$  metros. El pársec es *grosso modo* la distancia a la que un objeto mostraría una paralaje de 1 segundo de grado entre el Sol y la Tierra. Cuanto mayor es la paralaje, más cercano es el objeto, de tal forma que se puede usar para calcular las distancias de manera análoga al método utilizado de forma natural por nuestro cerebro con los objetos próximos a nosotros, comparando las imágenes de ambos ojos. Este efecto se puede percibir intentando por ejemplo poner el hilo en una aguja, primero con los dos ojos abiertos y luego con solo uno. Volviendo a las estrellas y objetos de la Vía Láctea, la oscilación de las posiciones relativas debidas a la paralaje anual es de como máximo un segundo de grado, por lo que no fue usada con éxito para determinar una distancia estelar hasta el siglo XIX. De hecho, la imposibilidad de medir paralajes llevó a muchos pensadores anteriores, como Tycho Brahe, el astrónomo más preciso del siglo XVI, a dudar de la espacialidad del fondo estelar. Actualmente, el método de la paralaje anual ha sido ampliamente utilizado para calcular la distancia de multitud de objetos astronómicos en la Vía Láctea; sin embargo, tiene un límite. A partir de unos cien años-luz la paralaje empieza a ser demasiado pequeña y deja de ser fiable para determinar distan-

cias. Siguiendo con el símil de la visión humana, para objetos suficientemente lejanos nos resulta imposible estimar de forma intuitiva las distancias. Para hacerlo usamos otro tipo de estrategias, como el análisis de la nitidez o los conocimientos que tenemos sobre los propios objetos.

Para calcular las distancias a aquellos objetos astronómicos tan lejanos que no admiten la aplicación del método de la paralaje, es preciso conocer alguna de sus propiedades. Los objetos que permiten el cálculo de su distancia a partir de alguna de sus propiedades son conocidos como *candelas estándar*. Una de las propiedades más utilizadas es la luminosidad, que en algunos objetos es conocida o al menos varía en el tiempo de una forma conocida. Conocer la luminosidad de un objeto no es inmediato sino que requiere de un proceso de calibración. Gracias a una combinación de décadas de observación y trabajos teóricos, hoy en día se sabe que las estrellas no pueden tener una configuración de características cualquiera, sino que responden a unos patrones que se han clasificado en *tipos espectrales*. Para relacionar los tipos con las características se puede consultar un *diagrama de Hertzsprung-Russell*. Es decir, gracias al *espectro electromagnético* de una estrella podemos conocer algunas de sus características, como su *luminosidad intrínseca*. Conociendo la luminosidad intrínseca de un objeto astronómico, podemos calcular a qué distancia se encuentra de nosotros analizando su *luminosidad aparente*. Al tener su distancia, podemos calibrar a su vez la luminosidad intrínseca de otros objetos que sabemos cercanos a él. Esto permite contar cada vez con un mayor número de candelas y mediante un proceso acumulativo ir aumentando la capacidad de medir distancias cada vez mayores.

Para las distancias galácticas, se usa un proceso similar al de las distancias dentro de la Vía Láctea. Se buscan parámetros y relaciones para estimar la luminosidad intrínseca de las galaxias, por ejemplo la velocidad de rotación en las galaxias espirales según la *relación Tully-Fisher* o la dispersión de velocidades estelares en las galaxias elípticas según la *relación Faber-Jackson*. Otro indicador para evaluar la distancia de una





Una espectacular fotografía de larga exposición, enfocando al polo celeste sur, tomada por Iztok Bončina desde el observatorio astronómico de La Silla, situado en un borde del desierto de Atacama en Chile. La trayectoria aparente de las estrellas en el cielo deja entrever la rotación de la Tierra.



galaxia es la fluctuación de su brillo superficial. Con este dato se puede estimar un número de estrellas por superficie aparente con métodos estadísticos y así calcular la distancia considerando una distribución homogénea. También se pueden usar como indicador de la distancia las propiedades de distintos objetos astronómicos identificables en las galaxias, por ejemplo determinadas *supernovas* (explosiones estelares). Algunas son muy luminosas, tienen características muy específicas y pueden observarse en cualquier tipo de galaxia. Por último, el método más utilizado es la *ley de Hubble* según la cual la distancia a una galaxia es proporcional a la velocidad a la que se aleja de nosotros. Esta velocidad se puede calcular analizando su espectro electromagnético, así que es aplicable a cualquier galaxia que podamos ver. Este método es en ocasiones el único posible, así que, cuando existen otras alternativas, hay que aprovechar para calibrarlo y corregir posibles errores provocados por variaciones locales en la velocidad de las galaxias.

## IDENTIFICACIÓN DE LOS OBJETOS ASTRONÓMICOS

Para la identificación de los objetos astronómicos resulta muy útil contar con representaciones gráficas del universo observable, como por ejemplo esferas o mapas celestes. En cualquiera de los dos casos, se está representando un espacio tridimensional sobre una superficie bidimensional. Este paso de las tres a las dos dimensiones se consigue mediante la representación como un simple punto de cada una de las direcciones hacia donde podemos observar. En el caso de la esfera celeste, la transformación es muy sencilla: hay que imaginar una superficie esférica rodeando la Tierra cortada por líneas infinitas con un extremo en su centro y proyectar todos los puntos de cada una de las líneas sobre su intersección con la superficie esférica. En el caso de un mapa, además hay que trasladar la información de una superficie esférica a una superficie plana. En un mismo punto de una esfera o mapa celeste pueden estar representados objetos astronómicos que se encuentran a

miles de millones de años-luz de distancia. Esto significa que pueden estar múltiples órdenes de magnitud más alejados entre sí que objetos representados en extremos opuestos de la esfera o mapa. Su objetivo no es pues una representación más o menos aproximada del universo, sino más bien una representación de cómo lo vemos desde la Tierra. Su razón de ser es en realidad facilitarnos la identificación de los distintos objetos astronómicos para posibilitar la coordinación de sus observaciones y la recopilación de información desde distintas fuentes. En los últimos años, han proliferado también las aplicaciones para teléfono móvil que nos muestran los objetos astronómicos más destacados en la dirección en la que orientamos nuestro aparato.

Las representaciones celestes son válidas para cualquier punto de la superficie terrestre, ya que el diámetro de nuestro planeta es insignificante en comparación con las distancias astronómicas. De hecho, ni tan solo el cambio de posición de la Tierra alrededor del Sol a lo largo del año es relevante en cuanto a la elaboración de los mapas celestes. Sin embargo ambos movimientos conllevan un cambio de velocidad que sí hay que tener en cuenta a la hora de localizar los distintos objetos astronómicos. Esto es debido al fenómeno conocido como *aberración de la luz* o *aberración astronómica* según el cual los objetos se muestran en posiciones aparentes distintas según la velocidad del observador. Es un fenómeno parecido al de un coche bajo una lluvia vertical desde el que se percibe a esta cayendo en ángulo. En el caso de la luz este ángulo provoca una variación de la posición aparente con la variación de la velocidad. Si bien la paralaje por la traslación anual de la Tierra provoca una oscilación de como máximo un segundo de grado, la aberración de la luz provoca una oscilación de unos 40 segundos de grado para todos los cuerpos celestes. En aquellos situados en la perpendicular a la eclíptica,

Hay muchas ideas que llevan un paso más allá al principio copernicano. Pasamos del sistema solar a la galaxia y de ella a millones de ellas, y ahora nos damos cuenta que eso ni siquiera es todo lo que hay.

MARTIN REES



la aberración aparece en forma de oscilación circular, mientras que en el plano de la eclíptica aparece en forma de oscilación lineal. En todas las posiciones intermedias aparece en forma de oscilación elíptica con el eje mayor paralelo a la eclíptica. Aunque la aberración anual debida a la traslación de la Tierra alrededor del Sol es la que provoca la oscilación más importante, también se da por efecto del movimiento de rotación terrestre o del sistema solar en la galaxia.

El uso de las constelaciones para la delimitación de las distintas regiones del espacio es algo que se viene haciendo desde las civilizaciones antiguas. Básicamente consiste en escoger un cierto número de estrellas en una determinada región del cielo e imaginar trazos que las unen para formar una figura que se pueda recordar fácilmente. En la actualidad, los límites de la mayoría de constelaciones siguen las directrices básicas establecidas por la UAI entre 1928 y 1930. Es muy difícil determinar el origen de cada una de las constelaciones actuales, aunque parece que algunas de ellas se remontan a las culturas mesopotámicas. En todo caso, de las 88 constelaciones consideradas por la UAI parece ser que casi la mitad fueron establecidas por los griegos. Uno de los primeros documentos donde aparecen compiladas es *El gran tratado* de Claudio Ptolomeo, conocido popularmente como *Almagesto* por habernos llegado a través de su traducción al árabe. Aparecido en el siglo II a.C., contenía un catálogo de más de mil estrellas, agrupadas en 48 constelaciones. Su principal limitación es que no contenía información de aquellas zonas del hemisferio sur celeste que no eran visibles desde Alejandría, donde se llevaron a cabo las observaciones. Los primeros europeos en ver las constelaciones australes fueron los portugueses en el siglo XV. Desde entonces se sucedieron diversas propuestas de nomenclatura para las constelaciones australes que acabaron cristalizando a finales del siglo XIX en la *Uranometría argentina*. En este documento se ordenaban sistemáticamente las denominaciones y límites de las constelaciones del hemisferio sur celeste. Entre las constelaciones más conocidas están las del zodiaco, situadas en torno a la línea de la eclíptica. Se trata de doce constelaciones usa-

das desde los tiempos babilónicos como referencia vinculada a los doce ciclos lunares anuales y adoptada por los griegos, a quienes debemos los nombres actuales. Como último apunte, hay que ser conscientes de que las estrellas de una constelación pueden encontrarse a cientos de años-luz unas de otras y puede incluso que alguna de ellas esté más alejada de las otras que de nosotros.

En cuanto al resto de estrellas de la Vía Láctea, uno de los primeros cartografiados sistemáticos fue el llevado a cabo por el satélite Hipparcos de la ESA entre 1989 y 1993. Determinó las distancias a unos dos millones y medio de estrellas midiendo sus paralajes. El catálogo resultante sigue siendo aún utilizado en la actualidad, aunque está previsto que sea superado por el que está realizando la sonda Gaia, lanzada en 2013 y también de la ESA. El nuevo catálogo tendrá cientos de millones de estrellas y otros objetos astronómicos de nuestra galaxia, muchos de ellos desconocidos hasta el momento, incluyendo datos como luminosidad aparente, posición, distancia o movimientos cuando eso sea posible. Pero hay que decir que más del 99% de los objetos de nuestra galaxia seguirán sin entrar en el catálogo. Todos ellos están concentrados en torno a un plano, el *plano galáctico*. Es por ello que desde la Tierra percibimos la Vía Láctea como una banda luminosa que nos rodea.

Para identificar los objetos observados, además de sus posiciones se usan sus propiedades, entre las que destaca la luminosidad. La luminosidad intrínseca de los objetos es en ocasiones difícil de determinar por lo que se usa la escala de *magnitud aparente*. Se trata de una escala que mide la luminosidad de los objetos tal y como son vistos desde la Tierra. Para realizarla se considera la luminosidad que tendrían vistos desde el exterior de la atmósfera. Se trata de una escala logarítmica inversa con un factor aproximado de 2,5. Es decir, cuanto menor sea el número en la escala mayor será la luminosidad, y esta última aumenta 2,5 veces con cada disminución en una unidad del primero. El Sol es el objeto más brillante en el cielo con una magnitud aparente de -26,8, seguido de la Luna con -12,6. El tercer cuerpo celeste más brillante después es Venus, cuya



magnitud aparente llega a un máximo de  $-4,4$ . Los otros cuatro planetas fácilmente reconocibles desde la Tierra, Júpiter, Marte, Mercurio y Saturno, tienen magnitudes aparentes que van de  $-2,9$  a  $-0,2$ , destacando así sobre el fondo estelar. La primera y segunda estrella con mayor magnitud aparente son Sirio y Canopus, con  $-1,5$  y  $-0,7$ , respectivamente. En un entorno urbano la magnitud de las estrellas que podemos ver sin ayuda de ningún aparato es como máximo 3, mientras que en zonas poco pobladas sin contaminación lumínica puede llegar a 6, lo que incluye muchas más estrellas. La galaxia de Andrómeda, una de las pocas que puede ser vista sin ayuda de aparatos, tiene una magnitud de 3,4. Con el telescopio espacial Hubble se pueden llegar a observar objetos con magnitudes aparentes de 30. Todas estas magnitudes corresponden a la parte visible del espectro electromagnético, pero se pueden usar otras partes de este para realizar escalas similares. En el caso del espectro visible, se conoce también como *escala de magnitud visual*. Para realizar mediciones precisas contamos con aparatos llamados *fotómetros* y para estimaciones o comprobaciones sencillas podemos utilizar simplemente nuestros ojos.

Finalmente, en el estudio de las galaxias es crucial saber cómo referirse a cada una de ellas para poder identificarlas. Si bien un número reducido de ellas cuenta con nombres, se han catalogado miles. Uno de los precursores más antiguos de los catálogos modernos es el catálogo Messier, una lista de algo más de cien objetos astronómicos publicada a finales del siglo XVIII por Charles Messier. El catálogo Messier incluía más de un centenar de objetos de carácter nebuloso entre los que había *cúmulos estelares*, pero también numerosas galaxias. Entre los catálogos más utilizados en la actualidad encontramos el *New General Catalogue* (NGC) y su extensión *Index Catalogue* (IC), ambos publicados originariamente a finales del siglo XIX. Cada catálogo utiliza una nomenclatura particular, de tal forma que una misma galaxia puede aparecer con distintos nombres. Por ejemplo, la galaxia de Andrómeda, una de las más cercanas a la Vía Láctea, tiene el código M31 según el catálogo Messier y el código NGC 224 según el *New General*

*Catalogue*. Existen catálogos más extensos como el *Catalogue of Principal Galaxies* (PGC) o el *Two Micron All-Sky Survey* (2MASS), y otros que usan nombres descriptivos en latín en lugar de códigos, como el *Catalogue of Named Galaxies* (CNG). Sin embargo, para las galaxias más comúnmente estudiadas una de las nomenclaturas más extendidas es una combinación entre NGC e IC.



## Las galaxias en el universo

Cuando observamos el universo, estamos obteniendo información sobre eventos que tuvieron lugar en el pasado, debido a la finitud de la velocidad de la luz y a las enormes distancias que separan a los objetos astronómicos.

Así pues, cuanto más lejos seamos capaces de ver, en mejor disposición estaremos para analizar la evolución cosmológica que nos ha llevado hasta aquí.



En ocasiones se ha definido el universo como todo aquello que existe, ha existido o existirá. Esta definición es muy ambigua y depende totalmente de nuestros conocimientos. Centrándonos en los que tenemos en la actualidad se puede definir de forma más precisa como un todo consistente en *espacio-tiempo*, distintas formas de energía (ondas electromagnéticas, materia...) y las leyes físicas que relacionan todo lo anterior. Esta definición es suficientemente amplia para incluir desde la vida y su evolución hasta la manera en que entendemos las ciencias experimentales e incluso las exactas. Etimológicamente hablando, la palabra viene del latín *universus*, del artículo *ūnus* (uno) y del participio pasivo de *vertere* (girar). Otra palabra que ha perdurado adquiriendo un significado similar es *cosmos*, proveniente del griego *κόσμος* (orden), originariamente contrapuesta a la palabra *χάος* (desorden). Aunque es cierto que a nivel local el universo tiene una estructura, a nivel global de momento no se ha podido encontrar. Una de sus características más destacadas es que se está expandiendo, lo que se ha interpretado como consecuencia de algo parecido a una gran explosión inicial conocida como Big Bang.



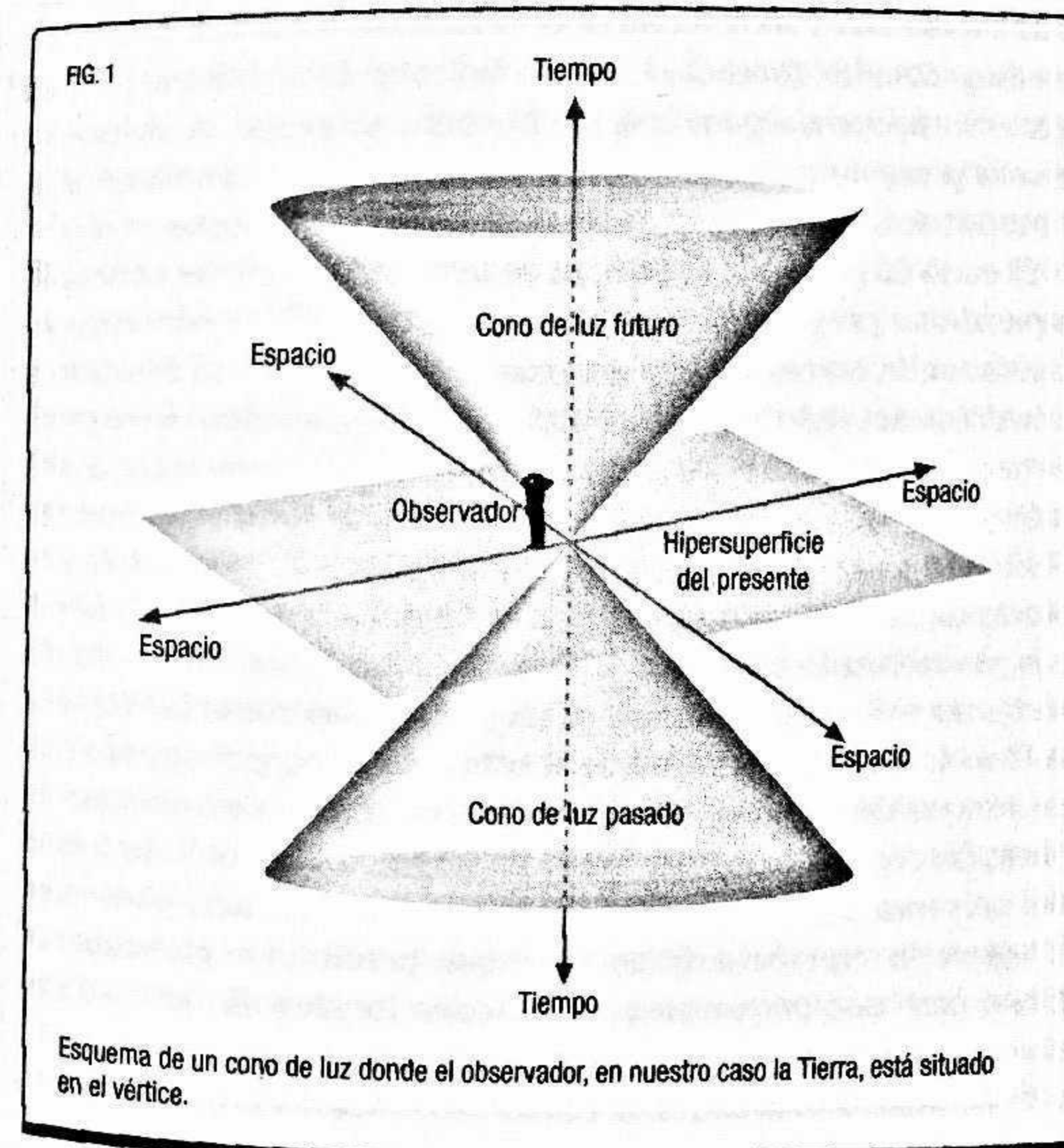
Las galaxias son las unidades estructurales más grandes del universo, lo cual no significa que sean las mayores estructuras, ya que están formando parte de *cúmulos* y *supercúmulos*. Incluso, parece ser que el material intergaláctico está distribuido formando filamentos gaseosos de baja densidad que unen a todas estas estructuras. Sin embargo, a una escala mayor, no se han podido detectar ni asimetrías significativas ni una dirección preferente. Las galaxias presentan una amplia gama de tamaños, formas y composiciones. El proceso mediante el cual se han originado y han adquirido sus configuraciones actuales sigue siendo un tema fundamental de investigación en la cosmología. Parece que en sus configuraciones actuales ha tenido mucha importancia su interacción mutua y acostumbran a ser el resultado de la fusión progresiva de galaxias menores. Aunque aún es poco lo que se sabe sobre cómo surgieron las primeras galaxias en el universo primitivo, es previsible que este conocimiento aumente de forma espectacular cuando se observen los confines del universo con la próxima generación de telescopios.

En cuanto al lugar que ocupamos en el universo, la historia nos ha dado una constante cura de humildad desplazándonos de una situación central a una cada vez más periférica y anecdótica. Tras la toma de conciencia de la no centralidad de la Tierra y la aparición de los modernos modelos heliocéntricos del sistema solar en el siglo XVI, no tardó mucho en surgir la idea de que el Sol era tan solo una estrella como las otras. Demócrito ya sugirió en la Antigüedad que la Vía Láctea era un conglomerado de estrellas, confirmándolo las observaciones de Galileo a principios del siglo XVII. Sin embargo, hasta principios del siglo XX no perdió su estatus de mayor estructura del universo. Fue gracias a las observaciones de Edwin Hubble y algunos de sus contemporáneos que se comprobó que nuestra galaxia era tan solo una entre muchas.

## ¿QUÉ ES EL UNIVERSO?

La definición del universo no es una tarea sencilla, así que vamos a intentar dividirla en partes de acuerdo con nuestros conoci-

mientos actuales. El primer concepto del que nos ocuparemos es el espacio-tiempo, el conjunto de las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal. Se trata de un modelo matemático que considera espacio y tiempo como completamente inseparables en un único continuo donde se desarrollan todos los eventos del universo. Una de las primeras cosas que llaman la atención cuando miramos al universo es que estamos observando eventos que tuvieron lugar en el pasado. Para describir este fenómeno se usa en ocasiones una representación del espacio-tiempo conocida como *cono de luz* (figura 1). Se trata de una representación simplificada en tres dimensiones, quitando una de las dimensiones espaciales. En realidad, el círculo que aumenta hacia el futuro





¿Cómo podemos mirar la galaxia  
y no sentirnos insignificantes?

RIDLEY SCOTT

y pasado desde el punto y tiempo actuales sería una esfera. En todo caso, es una representación útil en el sentido de que nos permite una visualización rápida del concepto espacio-tiempo. El cono de luz representa un espacio tridimensional de eventos que suceden en un plano a lo largo del tiempo. La superficie del cono viene marcada por la velocidad de la luz. Aquellos eventos que puede ver un observador situado en el punto y tiempo correspondientes al vértice son aquellos situados en la superficie inferior del cono. Por otro lado, el evento situado en el vértice tan solo podrá ser visto desde los puntos y tiempos situados en la superficie superior del cono. Considerando que nada puede superar la velocidad de la luz, todos los eventos situados fuera de la parte inferior del cono no pueden ejercer influencia alguna sobre el evento presente. A su vez, el evento presente no puede ejercer influencia alguna sobre todos los eventos situados fuera de la parte superior del cono.

El cono de luz nos da una idea de la complejidad del concepto espacio-tiempo y la dificultad de imaginarlo. Este concepto es central en la *teoría de la relatividad* propuesta por Einstein a principios del siglo xx. Según esta teoría la gravedad corresponde simplemente a la curvatura del espacio-tiempo en torno a una masa, que se puede ver tan solo como una forma de energía. Si bien se sabe que la curvatura espacial existe localmente por efecto de las acumulaciones de masa en los objetos astronómicos, de momento no se ha podido detectar globalmente en las recientes observaciones realizadas por sondas como la WMAP y la Planck. Es decir, parece que el universo es espacialmente plano aunque no están totalmente descartadas otras posibilidades, cuestión comúnmente conocida en cosmología como la forma del universo. Haciendo un símil en dos dimensiones, podremos imaginar la superficie de un lago, que percibimos globalmente plano pero con pequeñas ondulaciones locales. En el caso del universo no vemos toda la superficie en el mismo instante, sino que los puntos más alejados presentan estadios previos de evolución de acuerdo al cono de luz.

Una de las características más interesantes del universo observable es que al parecer se está expandiendo. Esto se ha interpretado como consecuencia de algo parecido a una gran explosión inicial conocida como Big Bang, que según las estimaciones más recientes ocurrió aproximadamente unos 13800 millones de años atrás. Los orígenes de esta teoría se remontan a principios del siglo xx cuando Georges Lemaître, aplicando la teoría de la relatividad al estudio del universo, argumentó que si estaba permanentemente en expansión tendría que haber existido un único punto de origen. Esta teoría encontró apoyo en las observaciones de Hubble sobre el espectro electromagnético de las galaxias que indicaban que la gran mayoría se están alejando de nosotros. Según estas observaciones, las más lejanas lo hacen a mayor velocidad, lo que se puede interpretar como un universo en expansión. Para intentar entender mejor este concepto, nos podemos imaginar hinchando un globo con manchas de color. Las manchas que se encuentren a una mayor distancia se alejarán a mayor velocidad, porque es la propia superficie del globo la que se expande. Una de las pruebas más importantes a favor de la teoría del Big Bang llegó décadas más tarde cuando se encontró la radiación de fondo de microondas predicha según la teoría. Al parecer, se trata de los primeros fotones que viajaron libremente en los estadios iniciales del universo y que siguen propagándose en la actualidad con una frecuencia menor (longitud de onda mayor) causada por su expansión. El modelo se ha ido perfeccionando con el tiempo gracias a personajes como Hawking, Ellis y Penrose, según los cuales el espacio-tiempo se originó coincidiendo con el origen de la energía. Por otro lado, el final que le espera a nuestro universo sigue siendo un tema en discusión. Entre las hipótesis consideradas encontramos el Big Rip, cuando se expande indefinidamente, y el Big Crunch, en el que vuelve a colapsar sobre sí mismo.

En cuanto a las dimensiones espaciales, nos encontramos con varias dificultades: el universo se está expandiendo y cuanto más lejanas son las galaxias menor es el estado de evolución con el que se nos presentan. Esto nos plantea la cuestión de a qué hay que referir las distancias espaciales. En este sentido, la



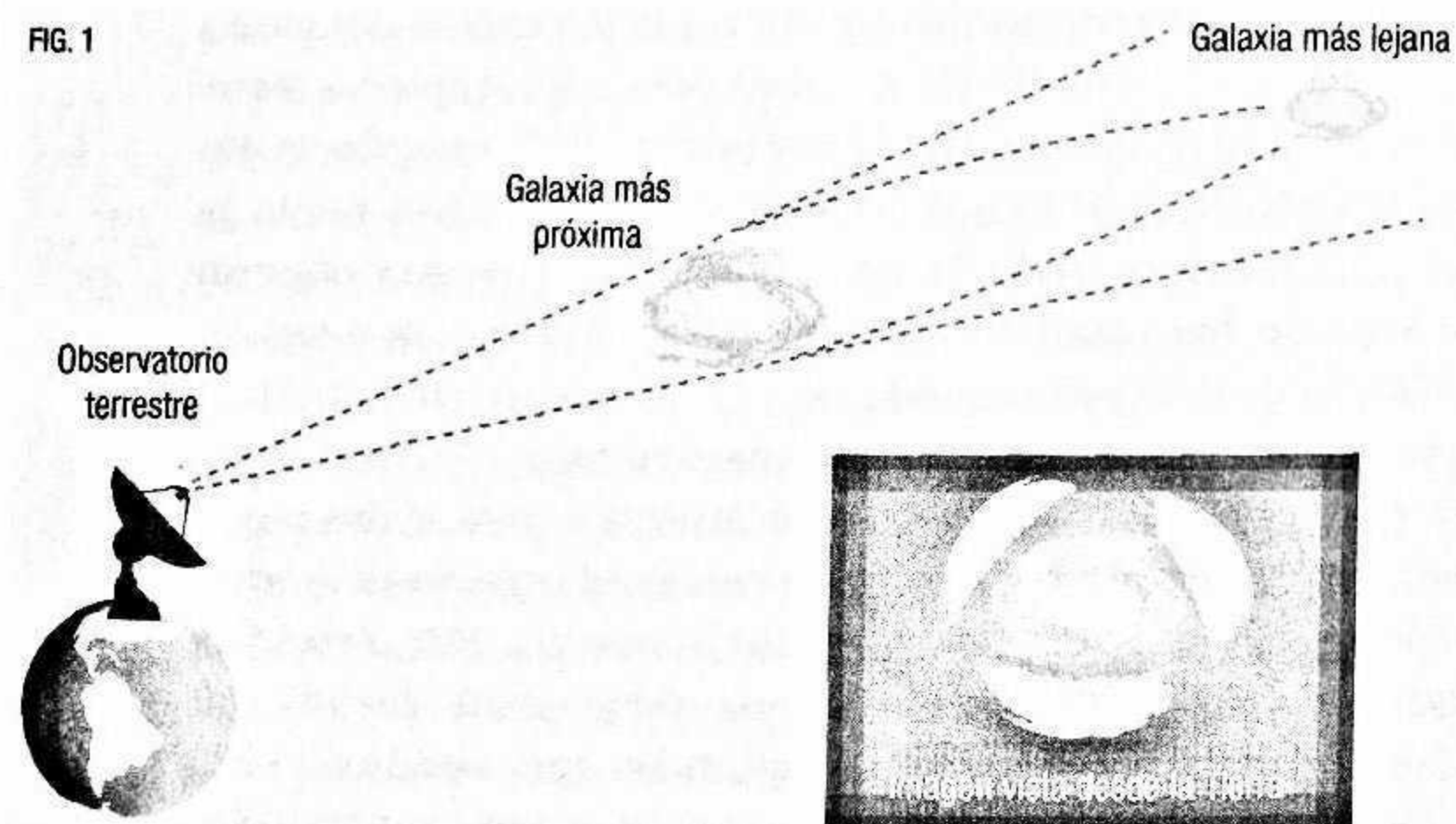
## LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN

Durante siglos la ley de la gravedad de Newton permitió calcular con precisión la mayoría de movimientos planetarios alrededor del Sol. Sin embargo, existía una anomalía que no encajaba de ninguna manera: el avance o precesión en la órbita de Mercurio. Hoy en día se sabe que la manera de cuadrar los cálculos es teniendo en cuenta la alta velocidad a la que viaja ese planeta. Para velocidades que se acerquen a la de la luz, hay que aplicar la teoría de la relatividad formulada por Einstein a principios del siglo xx para compatibilizar la gravedad de Newton con el electromagnetismo de Maxwell. La teoría se basa en que tanto las longitudes como los intervalos de tiempo son relativos al movimiento del sistema de referencia considerado. Las equivalencias entre distintos sistemas se obtienen mediante transformaciones que consideran la velocidad de la luz como una constante que no se puede superar. Einstein definió inicialmente estas transformaciones en su teoría de la *relatividad especial* y las aplicó posteriormente a la descripción de la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo en su teoría de la *relatividad general*.

### Describiendo la curvatura del espacio-tiempo

Uno de los conceptos fundamentales en la teoría de la relatividad general es el principio de equivalencia entre la aceleración experimentada en un punto de un campo gravitatorio y la ex-

FIG. 1



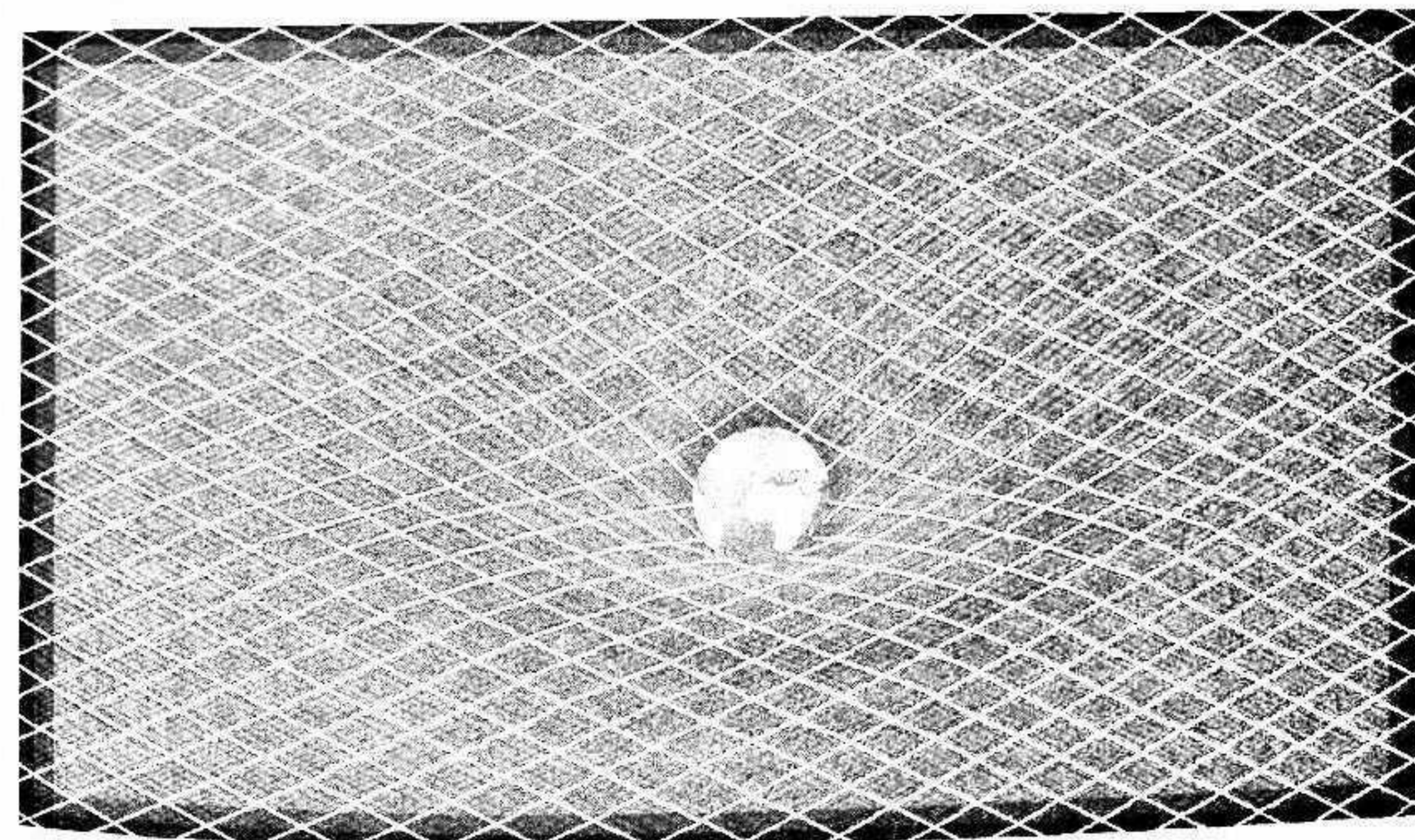
Esquema de cómo funciona un anillo de Einstein en el que intervienen dos objetos astronómicos alineados, en este caso dos galaxias. La masa de la galaxia más próxima curva el espacio-tiempo y la luz de la galaxia más lejana nos llega en forma de la imagen de la segunda repetida diversas veces alrededor de la primera.

perimentada en un sistema no inercial acelerado. Coloquialmente hablando, en un contenedor cerrado no hay nada que nos permita saber si realmente estamos inmóviles sobre una gran masa o propulsados por un cohete que nos confiere una aceleración permanente. Aplicando este principio, Einstein fue capaz de describir la curvatura del espacio-tiempo alrededor de una masa y predecir cuánto se desviaría la luz de las estrellas situadas tras el Sol en el eclipse de 1919. Actualmente, este efecto está más que contrastado e incluso se ha observado la luz de galaxias lejanas alrededor de otras más próximas situadas justo delante, en lo que se conoce como *anillo de Einstein* (figura 1) en su honor.

### La malla deformada

La curvatura del espacio-tiempo es un concepto abstracto que es difícil de imaginar. Para intentarlo se acostumbra a usar un símil en dos dimensiones (figura 2) en el que la presencia de una masa distorsiona una superficie plana, como lo haría una bola pesada sobre una cama elástica. En la superficie curva resultante, la distancia más corta entre dos puntos deja de ser una línea recta. De hecho ni siquiera su proyección sobre la superficie plana inicial es una línea recta.

FIG. 2

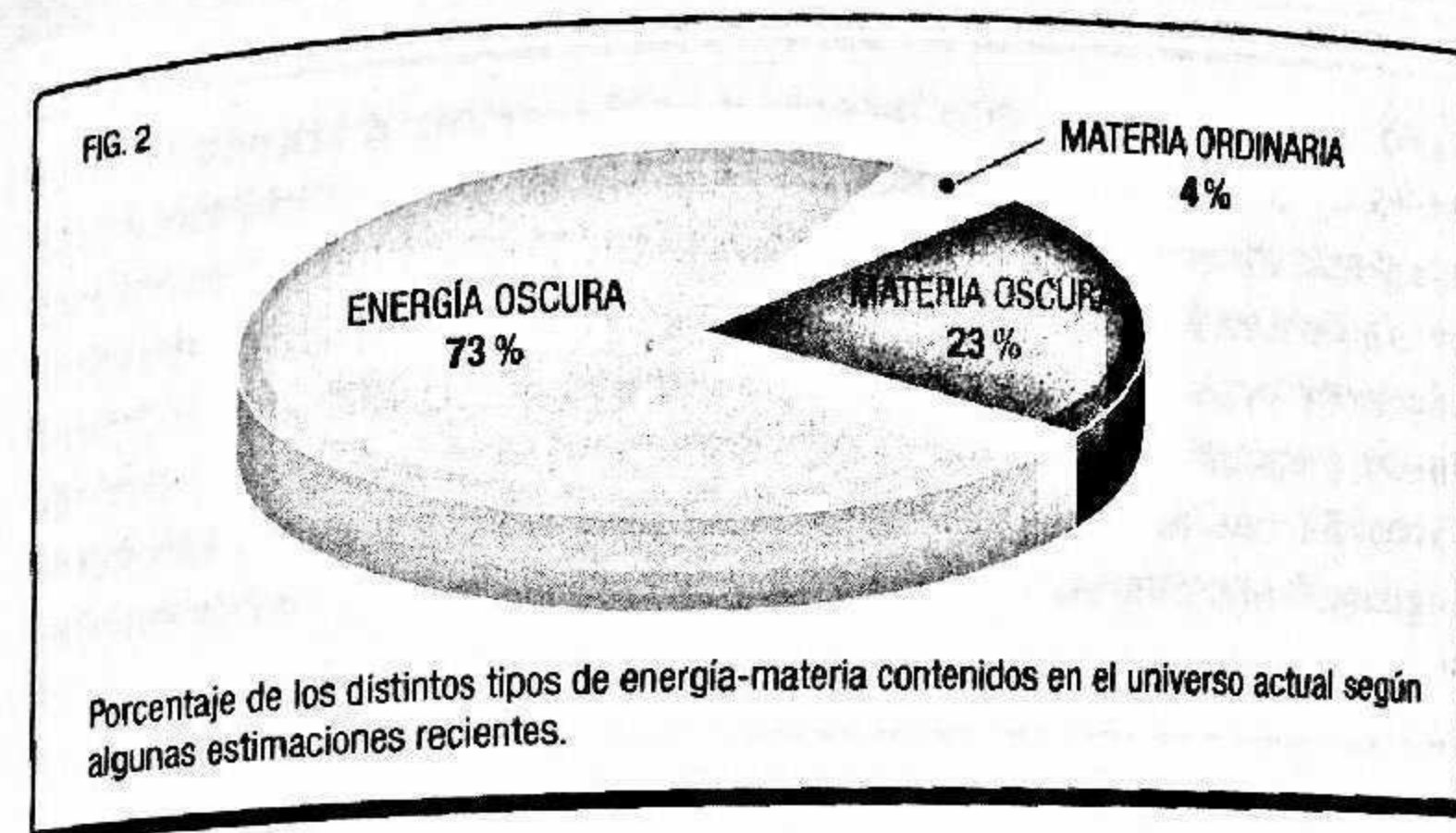


Esquema comúnmente usado para representar en dos dimensiones la curvatura provocada por una masa en el espacio-tiempo.



*distancia comóvil* es una medida de distancia independiente de la expansión del universo, es decir, nos indica dónde estarían los objetos en el momento cosmológico actual y no cuando la luz fue emitida. Por ejemplo, la radiación de fondo de microondas fue emitida por materia que actualmente puede estar formando galaxias como la nuestra. Teniendo en cuenta esto, la distancia comóvil hasta el límite del universo observable considerada actualmente es de unos 46 500 millones de años-luz en cualquier dirección. Llegados a este punto, nos podemos preguntar cómo puede ser esta cifra posible si el universo tiene tan solo 13 800 millones de años y nada puede superar la velocidad de la luz. La respuesta a esa pregunta nos lleva otra vez al concepto espacio-tiempo. Si bien su parte espacial parece ser globalmente plana, eso no significa que en su conjunto también tenga que serlo. En el universo, el espacio-tiempo está curvado de acuerdo a la expansión del espacio que se desprende de las observaciones. Es decir, no tiene sentido calcular una velocidad dividiendo el espacio comóvil por el tiempo cosmológico. El espacio-tiempo es mucho más complejo de lo que podemos imaginar de forma intuitiva. Incluso no está excluida la posibilidad de que, en algunas circunstancias, la luz pudiera volver a su punto de partida, aunque no se ha podido detectar nada similar.

El espacio-tiempo por sí solo no existiría si no estuviera lleno de distintos tipos de energía entre los que destacan la masa y las ondas electromagnéticas. Se estima que el universo tiene una densidad de energía-materia equivalente a unos  $9,9 \cdot 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ . De esta energía tan solo el 4% correspondería a átomos de materia ordinaria, lo que supone una media de menos de un núcleo de hidrógeno por metro cúbico. Justamente este es de largo el elemento más abundante en el universo, siendo al parecer incluso más abundante en forma de gas intergaláctico que en las estrellas, donde aparece concentrado. El resto de energía que conforma el universo es de origen desconocido, siendo un 23% lo que se conoce como *materia oscura* y un 73% lo que se llama *energía oscura* (figura 2). La materia oscura es un tipo de materia que no interactúa con la radiación electromagnética pero cuyos efectos gravitatorios pueden ser percibidos en los objetos astronómicos formados por



materia ordinaria. La energía oscura es una forma de energía presente en todo el espacio considerada para explicar la aceleración en la expansión del universo que indican las observaciones de las últimas décadas. La naturaleza exacta de la energía y la materia oscuras no se puede explicar todavía pero existen intentos de hacerlo mediante las propiedades de partículas subatómicas.

Respecto a la distribución de la materia ordinaria en su globalidad, parece ser que el universo observable es *homogéneo* e *isótropo* (esto es, cualquier punto del universo tiene las mismas propiedades e independientemente de la dirección que se esté observando, estas no variarán) si se considera una escala suficientemente grande. Este hecho se conoce como *principio cosmológico* y en este contexto una escala suficientemente grande quiere decir una escala supragaláctica del orden de cientos de millones de años-luz. A esta escala, la densidad del universo parece muy uniforme, sin asimetrías significativas ni una dirección preferente, a diferencia de lo que sucede a escalas menores. Es decir, a nivel local existe una clara estructura jerárquica: los satélites orbitan alrededor de planetas que orbitan alrededor de estrellas que orbitan alrededor de los centros de masas de las galaxias que se agrupan en cúmulos y supercúmulos. Sin embargo, globalmente no se ha podido determinar si el universo tiene algún tipo de estructura. Tampoco se ha podido localizar un punto central, ya que no se ha detectado ningún límite exterior.



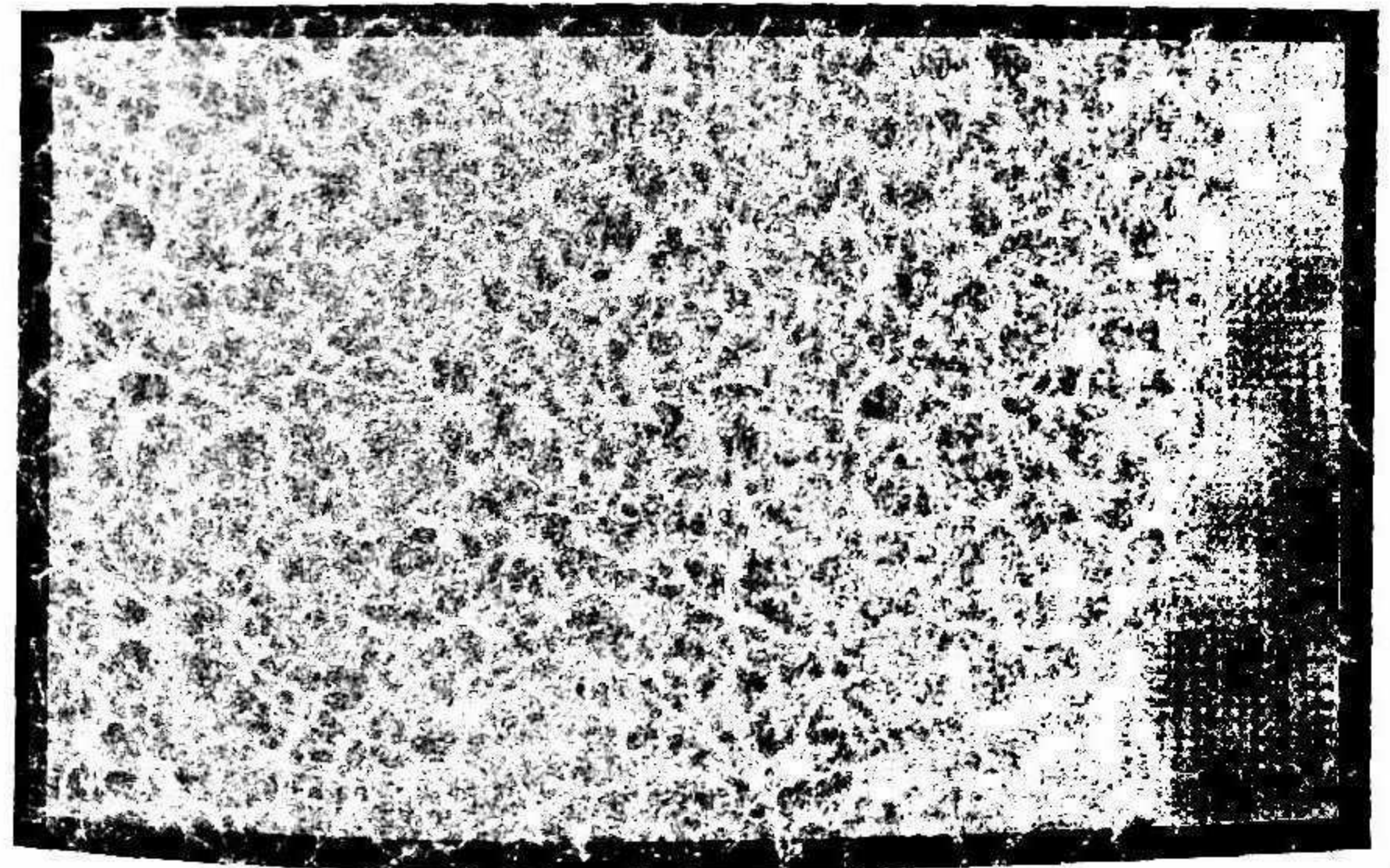
Las distintas formas de energía en el espacio-tiempo tienen un comportamiento que intentamos describir a través de una serie de leyes físicas. A día de hoy, no se ha podido detectar ninguna diferencia entre las que utilizamos para el universo local, donde los efectos de la evolución cósmica son mínimos, y las del resto del universo observable. Esto nos lleva a pensar que estas mismas leyes pueden servir para calcular las características del universo pasado hasta sus instantes iniciales según el modelo del Big Bang. Al parecer, el universo se encontraba inicialmente en un estado de extrema densidad y temperatura. Cuando se enfrió lo suficiente, aparecieron las partículas subatómicas y más tarde los átomos que por el efecto de la gravedad se unieron en nubes gigantes a partir de las cuales se formarían las estrellas y las galaxias. Se calcula que antes de que eso sucediera, la composición del universo era de un 75% de hidrógeno, un 24% de helio y pequeñas cantidades de elementos más pesados. Desde entonces, la materia interestelar se ha ido enriqueciendo en helio y elementos más pesados, generados por fusión atómica en las estrellas y esparcidos a través del viento estelar o incluso de episodios más violentos como las supernovas.

Finalmente, no hay que perder de vista que la información que nos llega del resto del universo a través de la radiación electromagnética lo hace con retraso. Este retraso es mayor cuanto más lejana sea la fuente, con lo que el universo podría ser muy distinto a como lo imaginamos. Por otro lado, los modelos cosmológicos considerados habitualmente se intentan ajustar al universo observable, pero también podemos encontrar otros más especulativos que intentan ir más allá. Existen hipótesis que desproveen al Big Bang de un carácter especial, siendo nuestro universo tan solo uno de muchos posibles, que podrían incluso coexistir. Según algunas de ellas, el universo observable estaría incluido en un universo más complejo y podría incluir a su vez otros universos, por ejemplo en el interior de los agujeros negros, provocados por los colapsos gravitatorios que los generan. De todas formas todas estas hipótesis son puramente teóricas y no se sustentan en ninguna observación.

## ¿QUÉ ES UNA GALAXIA?

Las galaxias son las unidades estructurales más grandes en las que se organiza la materia en el universo. Una galaxia es un sistema de estrellas, gas, polvo y materia oscura, orbitando alrededor de un centro de masas. El nombre «galaxia» proviene del griego *γαλαξίας*, que se podría traducir como «láctea», usado inicialmente para hacer referencia a la Vía Láctea y adoptado posteriormente para designar todas las estructuras similares detectadas en el universo. A día de hoy, se estima que el número de galaxias en el universo observable se eleva hasta más de un billón, siendo la separación entre ellas del orden de millones de años-luz. El espacio intergaláctico se puede considerar prácticamente vacío con unas densidades inferiores a un núcleo de hidrógeno por metro cúbico. Localmente, las galaxias se agrupan en cúmulos que a su vez lo hacen en supercúmulos. El mayor su-

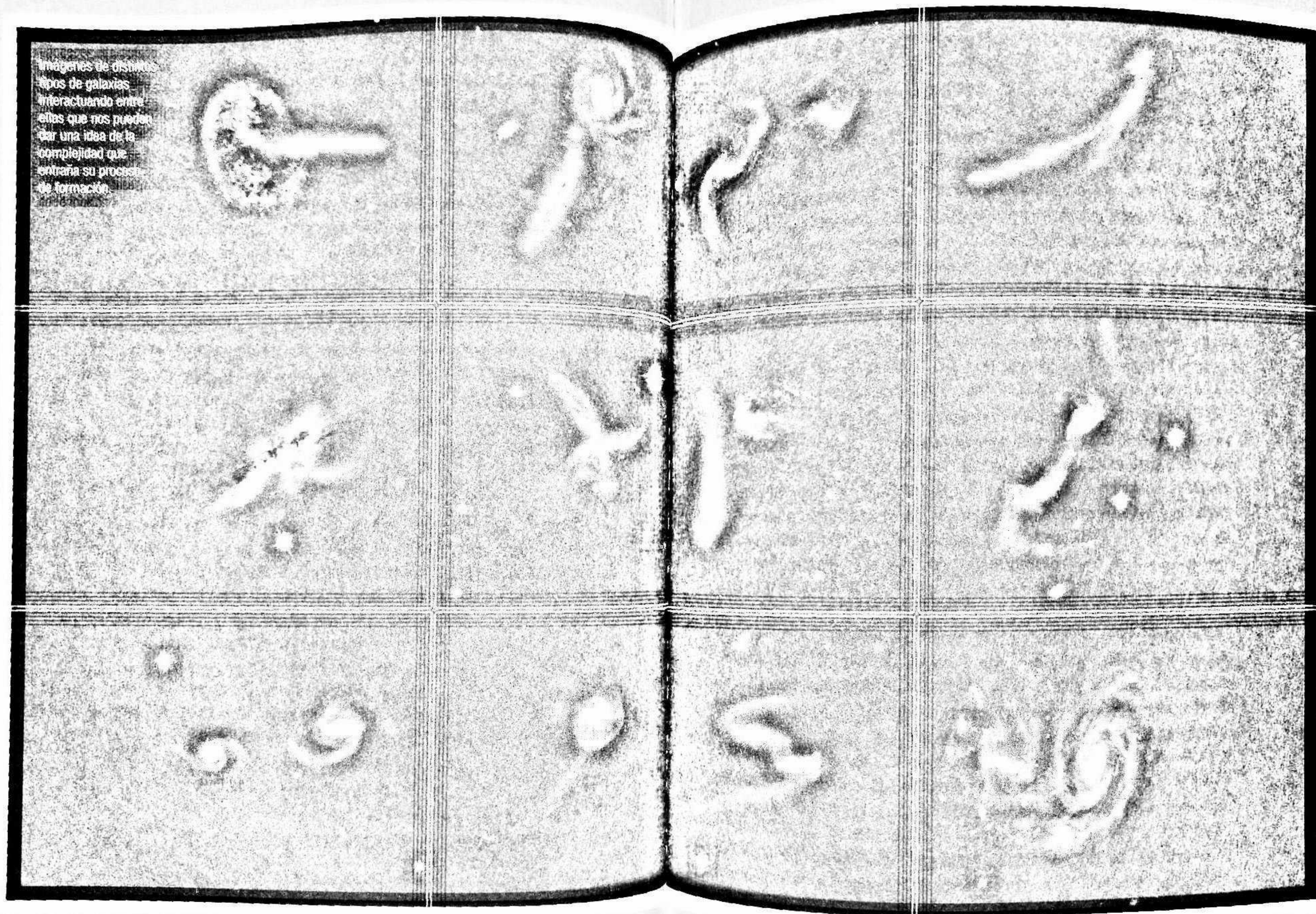
FIG. 3



Esquema de cómo se distribuiría la red de filamentos gaseosos que unen los supercúmulos de galaxias.



Imágenes de distintos  
tipos de galaxias  
interactuando entre  
ellas que nos pueden  
dar una idea de la  
complejidad que  
entraña su proceso  
de formación.





percúmulo de galaxias identificado hasta la fecha es el Laniakea, al que pertenece el Grupo Local que incluye a la Vía Láctea. Recientemente, gracias al telescopio XMM-Newton de la ESA, se han encontrado indicios de la existencia de una red de filamentos gaseosos de baja densidad en cuyos nodos se encuentran los supercúmulos de galaxias (figura 3). Dicha red contaría con aproximadamente la mitad de la materia ordinaria del universo, extendiéndose por su totalidad como consecuencia del proceso de formación de estructuras posterior al Big Bang. A una escala mayor, el universo se nos presenta como homogéneo e isótropo.

El primer recuento serio de galaxias en el universo observable tuvo lugar en la década de 1990, tras la puesta en órbita del telescopio espacial Hubble. Las imágenes del espacio profundo que proporcionó desvelaron la existencia de infinidad de galaxias hasta entonces ocultas a nuestros ojos. Las primeras estimaciones situaron el número en torno a los cien mil millones ( $10^{11}$ ), que se ha elevado a más de un billón ( $10^{12}$ ) según las más recientes. Estas últimas estimaciones se basan en nuevos modelos matemáticos que permiten deducir la existencia de galaxias que no se pueden ver con la tecnología actual por estar demasiado lejos y ser la radiación electromagnética que nos llega de ellas demasiado débil. Los modelos se han aplicado sobre datos obtenidos tras un minucioso trabajo para pasar a las tres dimensiones imágenes tomadas por el telescopio espacial Hubble. El análisis de las partes más lejanas del universo supone un viaje de hasta más de 13 000 millones de años atrás en el tiempo, lo que permite tener acceso a los estadios iniciales de su evolución tras el Big Bang, cuando se empezaron a formar las galaxias. Parece ser que en aquel entonces el número de galaxias en el universo era mucho mayor que el actual y que con el tiempo este ha disminuido por la fusión paulatina de las galaxias en otras cada vez mayores. De todas formas, las teorías sobre la historia del universo se mueven en el terreno especulativo y la observación de estas galaxias lejanas con la próxima generación de telescopios probablemente lleve consigo importantes descubrimientos al respecto. En este sentido, uno de los eventos importantes que nos depara el futuro cer-

cano será la colocación en órbita del telescopio James Webb, sucesor del Hubble.

Las galaxias presentan una gran variedad de tamaños, formas y composiciones. En cuanto al tamaño, su longitud puede variar desde centenares hasta centenares de miles de años-luz. En referencia a la forma, pueden ser desde elipsoides con los ejes más o menos iguales hasta completamente irregulares. Y en cuanto a la composición, su número de estrellas acostumbra a oscilar entre unos pocos centenares de millones hasta más de un billón. Además de las estrellas y los astros menores de sus sistemas (planetas, satélites, asteroides...), las galaxias contienen una gran cantidad de material interestelar que puede

suponer un porcentaje importante de su materia ordinaria. Se trata de una mezcla compuesta básicamente por un 70% de hidrógeno (91% en átomos) y un 28% de helio (9% en átomos), con pequeñas cantidades de elementos más pesados que pueden condensar en granos de polvo en las regiones más densas y frías. Las zonas de mayor densidad son conocidas como *nubes moleculares* y en ellas se puede encontrar hidrógeno en forma diatómica ( $H_2$ ). Es a partir del colapso gravitatorio de una parte de estas nubes que se forman las estrellas y sus sistemas planetarios. Las estrellas formadas a partir de una misma nube molecular se mantienen inicialmente agrupadas por efecto de su mutua gravedad en *cúmulos abiertos*. Estos cúmulos, que pueden contar con hasta miles de estrellas, son disgregados con el tiempo por la interacción gravitatoria con otros objetos astronómicos en su movimiento por la galaxia. Existe también otro tipo de cúmulos con estrellas más viejas llamados *cúmulos globulares* que son más densos y estables frente a la disgregación. Los cúmulos globulares tienen una distribución aproximadamente esférica y pueden contar con cientos de miles de estrellas confinadas en un volumen relativamente pequeño del orden del centenar de años-luz de radio. Algunos pueden alcanzar varios millones de masas solares y tener núcleos ex-

Hay al menos tantas galaxias en nuestro universo observable como estrellas en nuestra galaxia.

MARTIN REES

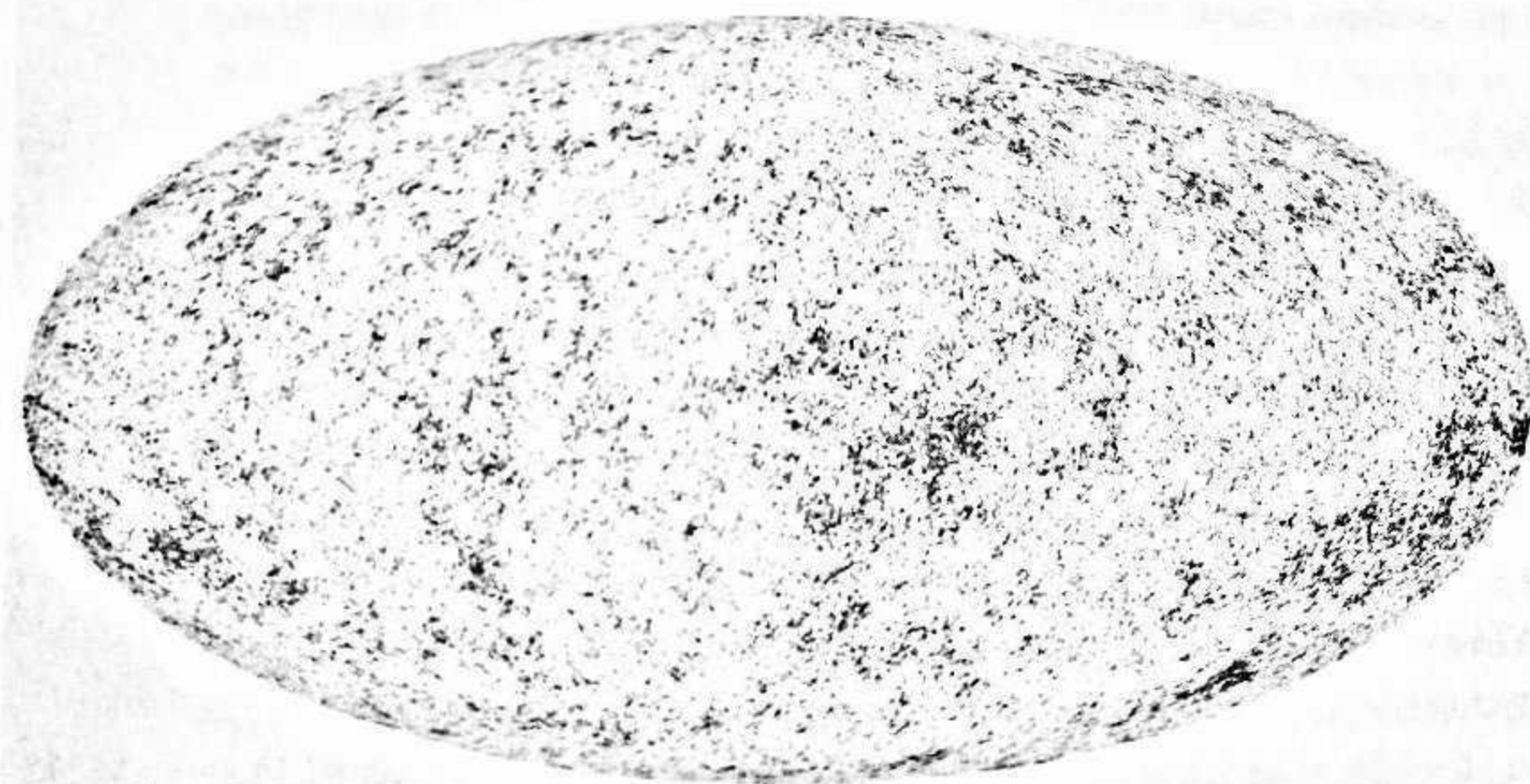


## EL ORIGEN DE LAS GALAXIAS

Entender el proceso por el cual se han formado las galaxias es una de las cuestiones abiertas más importantes en la cosmología actual y que recibe más atención desde el punto de vista teórico y observacional. Su origen está íntimamente relacionado con el proceso por el cual el universo primitivo pasó de ser prácticamente homogéneo, según la teoría, a tener irregularidades en su densidad, según parece indicar el estudio de la radiación de fondo de microondas.

### El universo temprano

Gracias a los datos recopilados por sondas espaciales como la WMAP o la Planck, estadounidense y europea, respectivamente, se han podido estudiar las diversas variaciones en la radiación de fondo de microondas (véase la figura) y averiguar que el universo presentaba ya zonas con densidades diferenciadas cuando esta fue emitida. A partir de estos datos y aplicando modelos matemáticos se puede calcular con éxito la distribución de galaxias y cúmulos observables en el universo local. Sin embargo, la elaboración de modelos a escala galáctica entraña mucha más dificultad, ya que se debe tener en cuenta la interacción entre la física de partículas subatómicas, la termodinámica del gas interestelar y el proceso de formación de estrellas.



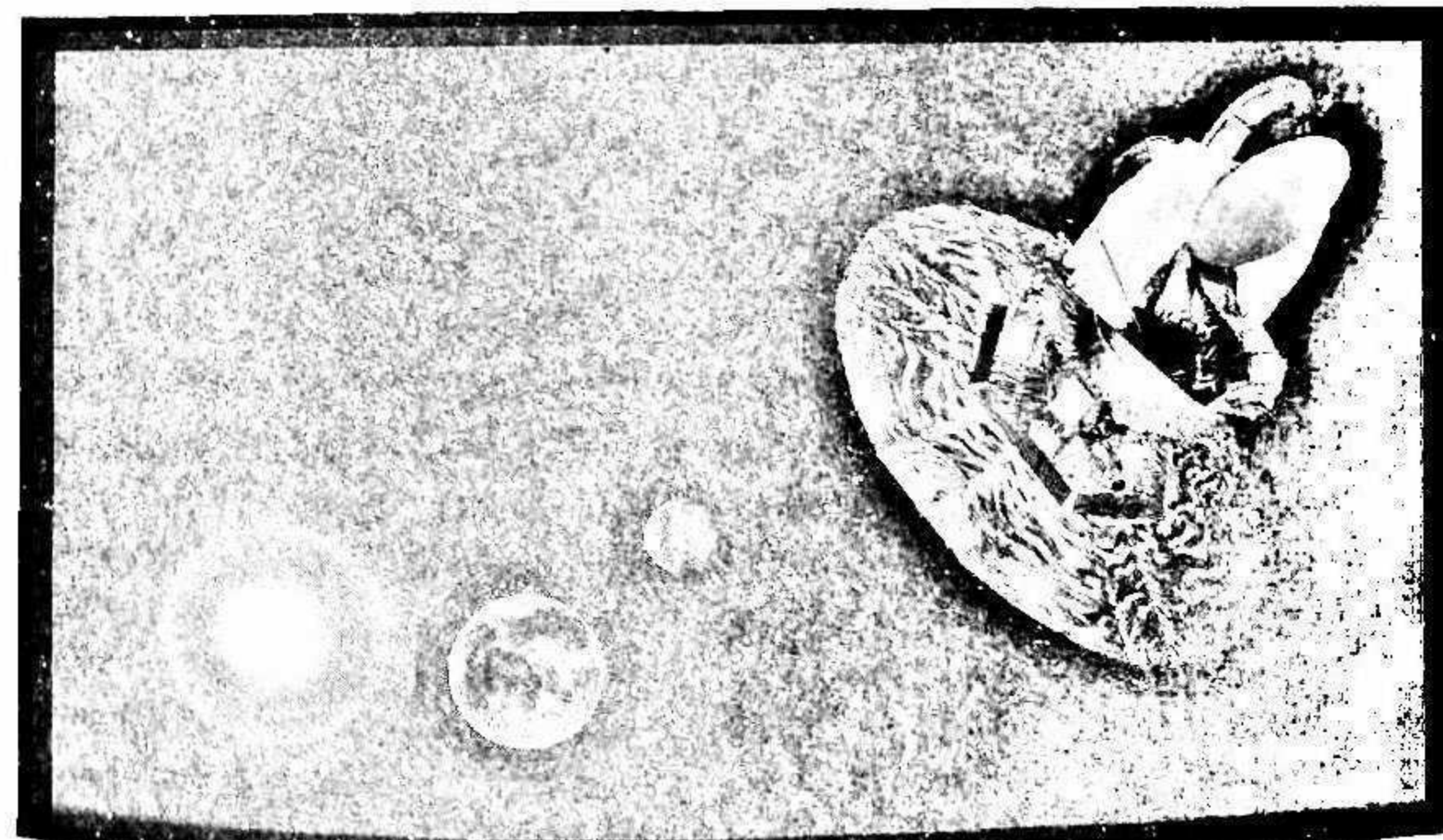
Representación aproximada de la variación de temperatura en la radiación de fondo de microondas según los datos obtenidos por la sonda Planck de la ESA. Se puede interpretar como una imagen del universo primitivo en el momento en que, según la teoría del Big Bang, se hizo transparente a la radiación al descender la temperatura lo suficiente como para permitir que se formaran átomos de hidrógeno.

### El siguiente paso

Una vez aceptado que ciertas zonas del universo temprano empezaron a mostrar densidades diferenciadas a partir de las cuales se explicaría la distribución de las galaxias, podremos intentar teorizar acerca de la aparición de estas, lo cual se supone sucedió hace unos 13000 millones de años. Pero ¿cómo pasar de una acumulación o nube de materia a una estructura en forma de disco galáctico? Para resolver este problema, se han propuesto diversas hipótesis. Sin embargo, ninguna de ellas es capaz de hacerlo completamente.

### Teorías de arriba-abajo y de abajo-arriba

Las teorías más antiguas al respecto, llamadas de arriba-abajo, favorecían la noción de que las galaxias con forma de disco aparecieron gracias al colapso de una gran nube de gas, compuesta sobre todo de materia oscura. La dinámica de este colapso culminaría con una estructura poco homogénea que produciría nubes más pequeñas, a partir de las cuales surgirían las estrellas individuales. Los astrofísicos no apoyan ya este concepto, y prefieren el llamado de abajo-arriba. En este caso, serían muchas pequeñas nubes de materia individuales las que se fusionarían para acabar dando forma a las galaxias, y no al contrario. Posteriormente las grandes estructuras galácticas se atraerían entre sí para dar lugar a los cúmulos de galaxias. Según este modelo, sería más frecuente la formación de galaxias pequeñas, lo cual está respaldado por las observaciones, que después se unirían para crear otras mayores. Aunque la teoría de abajo-arriba está más próxima a la realidad, aún se desconocen algunos detalles, que quizá podrán explicarse cuando sepamos más sobre la materia oscura.



Recreación artística de la WMAP. Se muestran también la Tierra, la Luna y el Sol.



tremadamente masivos, por lo que se cree que quizá albergan agujeros negros en sus centros. La densidad de estrellas en los cúmulos globulares puede llegar a ser muy elevada, de manera que existen fuertes interacciones entre ellas con una frecuencia de colisiones relativamente alta.

En cuanto a la formación de las galaxias, es una cuestión que se está estudiando cada vez con más interés. Hoy en día se sabe que en su morfología actual ha tenido mucha importancia su interacción mutua y que muchas son el resultado de una fusión sucesiva de galaxias menores. Sin embargo, curiosamente se sabe menos sobre su origen que sobre el del propio universo. En este sentido, nos puede ayudar el estudio de la naturaleza de los cúmulos estelares. Parece que la mayoría tiene una edad bien definida con estrellas formadas en el mismo momento por encontrarse aproximadamente en la misma etapa de evolución. Precisamente fue el descubrimiento de este hecho lo que dio lugar a las primeras teorías sobre la evolución de las estrellas. En general, las estrellas que componen los cúmulos abiertos son jóvenes y se conocen como *estrellas de Población I*, mientras que las estrellas que componen los cúmulos globulares son viejas y se conocen como *estrellas de Población II*. Las estrellas de Población II tienen un contenido en elementos pesados relativamente bajo si lo comparamos con el de las estrellas de Población I, lo que indica que estas últimas están formadas por material proveniente de estrellas anteriores.

Los cúmulos globulares figuran entre los objetos astronómicos más antiguos y, aunque se encuentran en gran cantidad tanto en el interior como en el exterior de muchas galaxias, no abundan los ejemplares jóvenes que permitirían el estudio de las condiciones en que se originaron. En este sentido, el análisis de un posible cúmulo globular en gestación descubierto recientemente utilizando el observatorio ALMA nos aportará sin duda claves sobre las condiciones en las que se originan tanto los cúmulos globulares como las galaxias. Se trata de una nube molecular sin estrellas extremadamente masiva y densa, bautizada extraoficialmente como «el petardo» y situada en el interior del

par de galaxias en colisión conocidas como galaxias Antena, a una distancia estimada en torno a los 50 millones de años-luz. La teoría nos dice que las formaciones gaseosas tienen que ser masivas y frías para poder contraerse por atracción gravitatoria. Además, para colapsar contrarrestando la presión generada al empezar la contracción, es necesario que superen una cierta masa crítica. Así pues, los brotes intensos de formación estelar suelen tener lugar en las nubes más grandes. Por otro lado, aunque el destino de muchos cúmulos estelares es la disgregación con el tiempo, también existen procesos de fusión según se deduce de la existencia de varios grupos de estrellas en distintas fases de su evolución en ciertos cúmulos, como Omega Centauri en la Vía Láctea. A una escala mayor, parece que las galaxias se forman por un ensamblaje de materia oscura que va creando formaciones de gas y estrellas. Este proceso habría tenido lugar prácticamente desde el origen del universo. Algunas dataciones de las estrellas más antiguas de la Vía Láctea las sitúan por ejemplo en un periodo no muy posterior al de emisión de la radiación de fondo de microondas.

Todo lo que sabemos sobre las galaxias procede de la información que nos da la radiación electromagnética que emiten y absorben los objetos astronómicos que las forman. Sin embargo, no solo están constituidas por estos objetos sino que también tienen una cantidad importante de materia oscura que no interactúa con la radiación electromagnética. Su existencia se desprende de los efectos gravitatorios que ejerce sobre los objetos que sí interactúan con esta última. Por ejemplo, se puede calcular la masa de un objeto a partir de la curvatura de la luz que nos llega de los objetos situados detrás. Mediante métodos similares se ha estimado así que la masa del cúmulo de Pandora, una de las mayores agrupaciones de cúmulos galácticos observadas hasta la fecha, es cuatro veces superior a la que cabría esperar según la materia detectada a través de la radiación. En cuanto al conjunto del universo, se estima que la cantidad de materia oscura es del orden de unas cinco veces mayor que la cantidad de materia ordinaria. Aunque es muy poco lo que hoy en día se sabe de la materia oscura, es posible que en las próximas décadas se



den importantes avances en su comprensión. En este sentido, recientemente se han puesto en marcha observatorios que en lugar de detectar ondas electromagnéticas detectan ondas gravitatorias. Incluso, ya se han detectado algunas de ellas gracias al proyecto estadounidense LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*). Se trata de dos grandes instalaciones, consistiendo cada una de ellas en dos brazos ortogonales de varios kilómetros a través de los que se envía un haz láser desdoblado y se buscan las interferencias causadas por ondas gravitatorias que distorsionan el espacio-tiempo. Proyectos parecidos se están desarrollando en otros países, como el VIRGO en Italia, el TAMA en Japón o el GEO en Alemania, pero lo realmente interesante sería realizar estas observaciones desde el espacio para evitar las interferencias terrestres. Así, la NASA y la ESA están trabajando para posibilitar en las próximas décadas el proyecto LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*).

## ¿QUÉ LUGAR OCUPAMOS EN NUESTRA GALAXIA Y EL UNIVERSO?

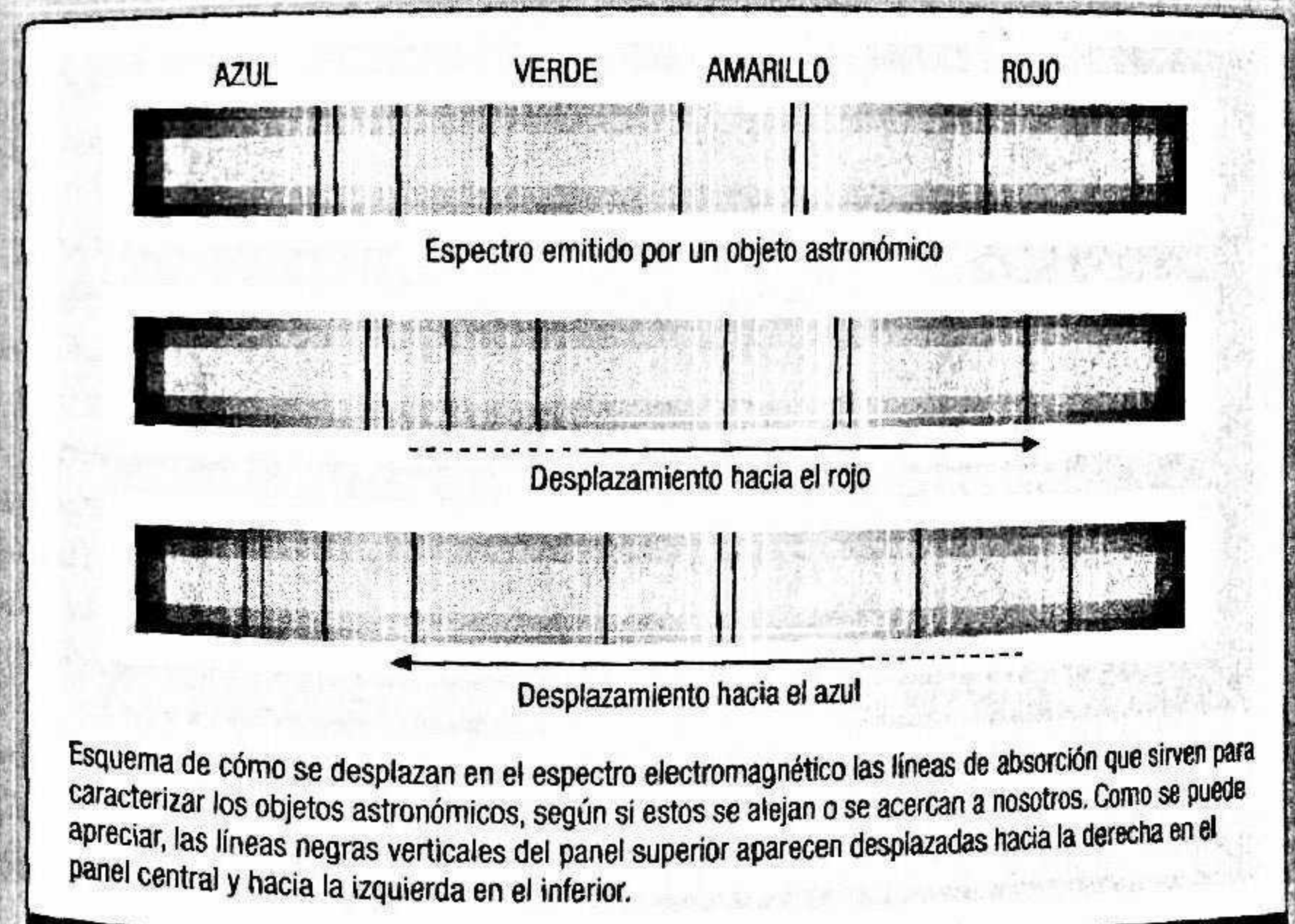
La historia del conocimiento humano ha sido una constante cura de humildad, desplazándonos de una situación central a una cada vez más periférica y anecdótica. No mucho tiempo después de la aparición de las teorías heliocéntricas modernas en el siglo XVI, el Sol fue ya relegado al estatus de una estrella igual que las otras. Giordano Bruno llegó a esa conclusión considerando que la imposibilidad de detectar la paralaje de las estrellas indicaba una distancia mucho mayor que las existentes entre los cuerpos del sistema solar. Edmund Halley también fue clave en la superación del heliocentrismo, ya que pudo contrastar que algunas de las posiciones relativas de las estrellas obtenidas en su época habían cambiado respecto a las registradas por los griegos antiguos. Esta observación daba a las estrellas un carácter individual y abría definitivamente la posibilidad de que estuvieran ocupando un espacio tridimensional, como ya había avanzado Bruno antes de ser quemado por la Inquisición. Por otro lado, la idea de la Vía Láctea como

## EL EFECTO DOPPLER

El efecto Doppler consiste en el cambio en la frecuencia de una onda percibida por un receptor por efecto de su movimiento relativo respecto al emisor. Descrito con precisión por Christian Doppler en el siglo XIX, podemos encontrar múltiples ejemplos cotidianos de él en la actualidad. Uno típico es el del sonido emitido por una ambulancia que nos llega con mayor frecuencia (más agudo) cuando esta se acerca y con menor frecuencia (más grave) cuando se aleja. La velocidad de una ambulancia (unos 13 m/s) es suficientemente importante respecto a la del sonido (unos 340 m/s), para que podamos apreciar el cambio de frecuencia en el momento en que llega a nuestra posición y pasa de acercarse a alejarse.

## El desplazamiento del espectro electromagnético

Lo mismo ocurre con las ondas electromagnéticas emitidas por los distintos objetos astronómicos. Estos emiten y absorben ondas electromagnéticas en diversas frecuencias. El conjunto de frecuencias con distintas intensidades que nos llega de un objeto es su espectro electromagnético. Algunos objetos tienen espectros característicos que se pueden identificar, por lo que, analizando si nos llegan con mayor o menor frecuencia, podemos saber si se acercan o alejan de nosotros. En el caso de la parte visible del espectro (véase la figura), la luz se desplaza hacia la parte del rojo cuando el objeto se aleja, en lo que se conoce como desplazamiento hacia el rojo. Por el contrario, cuando se acerca se produce un desplazamiento hacia el azul.





Las galaxias tienden a agruparse en grupos (cúmulos). Esta impresionante foto, tomada por el telescopio espacial Hubble, muestra al cúmulo Abell 2218, situado a unos tres mil millones de años-luz. Casi todos los objetos brillantes que se aprecian en la foto son galaxias del citado cúmulo. Las raras estructuras con forma de arco son imágenes distorsionadas por la gravedad de galaxias ubicadas detrás. Abell 2218 es tan masivo y compacto que su fuerza de gravedad tuerce y entorpece esa luz, generándose a raíz de ello múltiples imágenes de esas galaxias del otro lado. Que desde la perspectiva visual de la Tierra se ven deformadas en forma de arcos.



un conglomerado de estrellas había sido ya sugerido por Demócrito en la Antigüedad y constatado por Galileo mediante observaciones con su telescopio.

La Vía Láctea se puede ver a simple vista desde la Tierra como una franja luminosa difusa que divide el cielo en dos hemisferios aproximadamente iguales. Sin embargo, el número de otras galaxias que se pueden ver sin instrumentos de observación es muy reducido. Entre las más destacadas está la galaxia de Andrómeda, una de las primeras en ser observada. Su primera observación conocida corresponde al persa Abd Al-Rahman Al Sufi, que vivió en el actual Irak en el siglo x. Otro de los hitos importantes en la observación de otras galaxias ocurrió a finales del siglo xviii, cuando Charles Messier publicó su catálogo de los objetos astronómicos más brillantes con aspecto nebuloso. Hoy en día, se sabe que una treintena de esos objetos son galaxias, entre las que se puede encontrar la de Andrómeda (M31). Poco después, William Herschel fue capaz de distinguir con su potente telescopio que algunos de los objetos nebulosos de la lista de Messier eran en realidad cúmulos de estrellas. Posteriormente publicó catálogos propios, que constituirían la base del *New General Catalogue*, con miles de objetos nebulosos, que, como se sabe hoy en día, incluyen un gran número de galaxias. Ya en el siglo xix se desarrollaron telescopios suficientemente potentes para poder distinguir la morfología elíptica o espiral de las galaxias y fuentes lumínicas individuales en algunas de ellas. El número de galaxias descubiertas a principios del siglo xx aumentó aún más gracias a las exploraciones fotográficas.

A principios del siglo xx Heber Curtis identificó varias supernovas en la galaxia de Andrómeda, que de media se veían unas diez veces menos luminosas que las de nuestra propia galaxia. De esta forma fue capaz de estimar su distancia en más de medio millón de años-luz. El hecho de que la galaxia de Andrómeda era un objeto exterior a la Vía Láctea se impuso en las décadas siguientes, gracias a estimaciones adicionales de su distancia, como las de Ernst Öpik. Por otro lado, Hubble fue capaz de identificar con el telescopio del Monte Wilson grupos de estrellas individuales en

los bordes de diversas galaxias que contenían *estrellas cefeidas*. Estas estrellas se caracterizan por tener cambios de luminosidad con una periodicidad y amplitud muy regulares. Esto le permitió determinar a qué distancia se encontraban y así certificar que eran mucho más lejanas que cualquier parte de la Vía Láctea. Todas estas observaciones sirvieron de prueba definitiva de que existían otras galaxias además de la nuestra.

Hubble realizó también la primera clasificación morfológica de las galaxias y observó, teniendo en cuenta el efecto Doppler en la luz que nos llega de ellas, que la mayoría se aleja a velocidades proporcionales a su distancia respecto a nosotros. Es decir, el espectro electromagnético emitido desde las galaxias presenta un desplazamiento hacia frecuencias menores. Este desplazamiento es conocido como *desplazamiento al rojo*, por ser de ese color la luz con menor frecuencia. Es un fenómeno parecido al cambio de frecuencia en el sonido de una ambulancia, que oímos más grave cuando esta se aleja. El desplazamiento al rojo del espectro de las galaxias fue identificado ya por Vesto M. Slipher en 1912, cuando trabajaba en el observatorio Lowell de Arizona (EE. UU.). Hubble se dio cuenta de que el desplazamiento era mayor cuanto más alejada estaba la galaxia, interpretando este fenómeno como una evidencia de que las galaxias se alejan unas de otras y que el universo se expande. Este descubrimiento dio una base a la hipótesis del Big Bang según la cual el universo se creó tras algo parecido a una gran explosión inicial. Esta hipótesis recibió otro gran impulso cuando, décadas más tarde, se descubrió la radiación de fondo de microondas que había predicho. Según la gran cantidad de datos recopilados en las últimas décadas, parece ser que la expansión del universo está incluso en fase de aceleración, aunque de momento no se comprende a qué es debido.

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una de las 50 000 o 100 000 millones de galaxias en el universo. Y con cada paso, con cada ventana que la astrofísica moderna ha abierto en nuestra mente, la persona que se quiera sentir en el centro de todo acaba encogiéndose.

NEIL DEGRASSE TYSON



Teniendo en cuenta y aceptando que el universo observable puede ser relegado en el futuro a una situación no central, vamos a ver qué lugar ocupamos en él. Actualmente, sabemos que la Tierra es tan solo uno de los ocho planetas conocidos que orbitan alrededor del Sol, y este a su vez es una entre la multitud de estrellas que conforman la Vía Láctea. Vemos parte de nuestra galaxia en forma de una franja difusa en el cielo como resultado de la acumulación de la luz de multitud de estrellas y material interestelar en torno al plano galáctico. Sin embargo, podemos ver las estrellas de nuestra vecindad inmediata en todas las direcciones, ya que la galaxia tiene un grosor estimado en aproximadamente unos dos mil años-luz. En cuanto al lugar de la Vía Láctea en el universo, esta está formando parte de un cúmulo de galaxias denominado Grupo Local. Es la segunda mayor de las tres galaxias espirales gigantes que dominan el cúmulo, detrás de la de Andrómeda y por delante de la del Triángulo. Las otras galaxias menores que forman parte del cúmulo orbitan, o bien alrededor de alguna de las tres mayores, o bien alrededor de su centro de masas, situado entre Andrómeda y la Vía Láctea. Además, nuestro Grupo Local está contenido en el supercúmulo de Virgo que, con un diámetro de más de un centenar de millones de años-luz, está constituido por el cúmulo de Virgo junto con al menos otro centenar de cúmulos de galaxias. Tan solo en el cúmulo de Virgo existen más de un millar de galaxias, algunas de las cuales figuraban ya en el catálogo de Messier antes de ser identificadas como tales. Recientemente, se ha detectado que el supercúmulo de Virgo forma parte del supercúmulo aún mayor llamado Laniákea, uno entre los diez millones de supercúmulos que se estima contiene el universo observable.

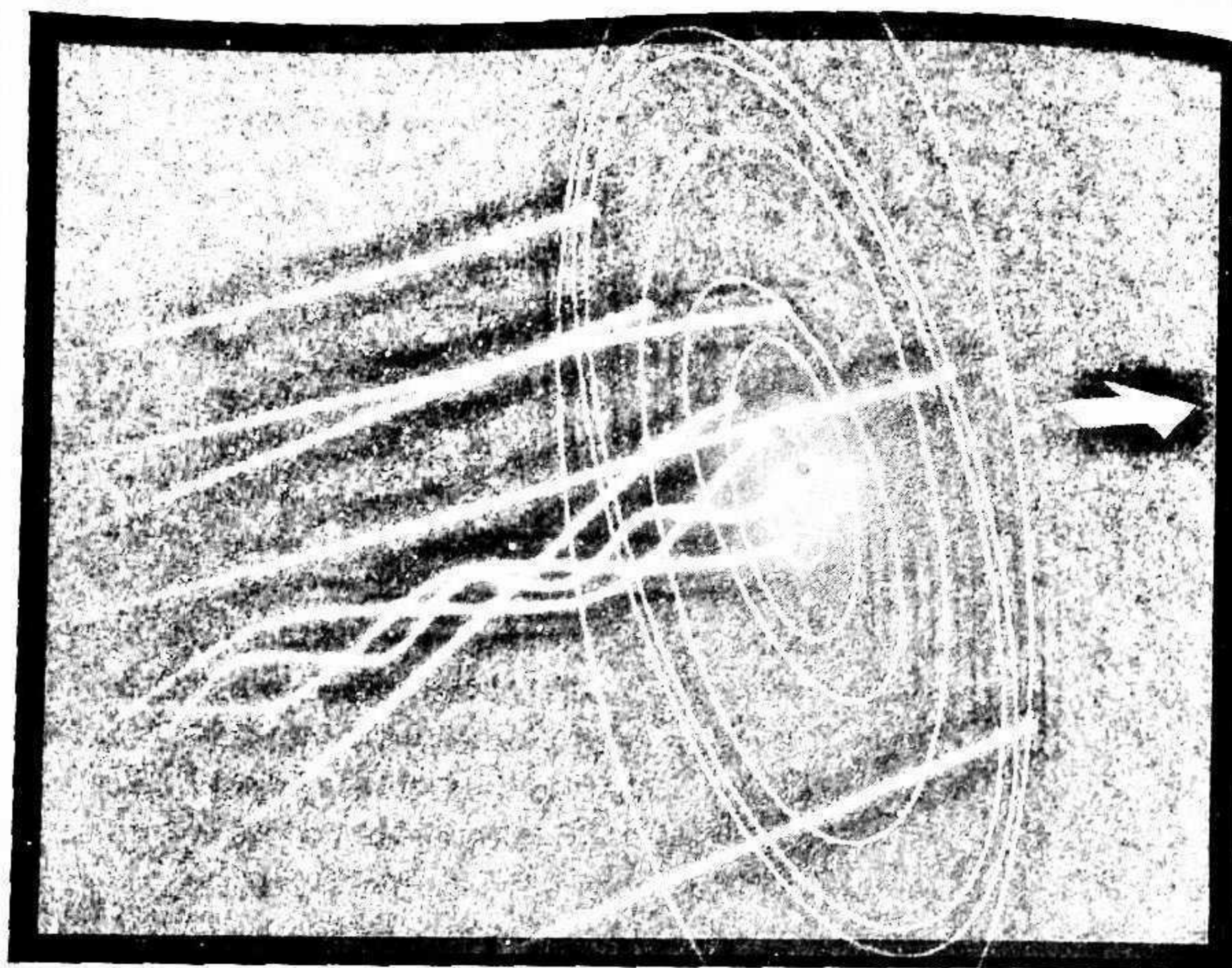
Una cuestión de especial interés es la situación que ocupa el sistema solar en la Vía Láctea. Desde la perspectiva del sistema solar, sus ocho planetas conocidos orbitan alrededor del Sol en planos con ligeras inclinaciones en torno al plano invariable calculado a partir de las masas y órbitas de todos sus cuerpos. Visto desde la Tierra, el plano orbital de nuestro planeta se corresponde con la circunferencia celeste conocida como

eclíptica, que atraviesa las constelaciones del zodiaco, alrededor de la cual aparecen siempre los demás planetas y la Luna. La inclinación del plano orbital terrestre es de unos  $23,4^\circ$  respecto al plano ecuatorial celeste definido como perpendicular al eje de rotación de nuestro planeta. Esto provoca que a lo largo de la rotación diaria de la Tierra veamos una variación en la orientación de la eclíptica, perceptible en la posición de las constelaciones del zodiaco, los planetas y la Luna. Lo mismo ocurre con el plano galáctico en torno al cual se estructura la Vía Láctea, para el que se considera una inclinación respecto al plano ecuatorial celeste de unos  $62,9^\circ$ . Al ser esta inclinación relativamente alta, la franja luminosa que marca nuestra galaxia se nos puede aparecer cerca del cenit o del horizonte en distintos momentos de una misma noche. De hecho, para los observadores situados entre  $62,9^\circ$  de latitud norte y  $62,9^\circ$  de latitud sur, pasa por el cenit un par de veces al día. El polo norte galáctico se encuentra a  $12^h 51^m$  de ascensión recta y  $+27^\circ 08'$  de declinación, en la constelación de Coma Berenices. El polo sur galáctico se encuentra a  $0^h 51^m$  de ascensión recta y  $-27^\circ 08'$  de declinación en la constelación del Escultor (Sculptor). De todas formas, la inclinación exacta del plano galáctico no se puede determinar con precisión, por lo que se acostumbra a usar el plano galáctico aparente definido mediante la línea que une el Sol con el centro galáctico. Si bien se estima que en realidad el Sol se encuentra a una distancia del plano galáctico del orden de 50 años-luz, este valor es tres órdenes de magnitud menor que los aproximadamente 26 500 años-luz a los que se encuentra del centro galáctico. Así pues, *grosso modo* podemos considerar que el sistema solar se encuentra en el plano galáctico, lo que en términos observacionales se traduce en que vemos la Vía Láctea dividiendo el cielo en dos hemisferios aproximadamente iguales.

Finalmente, otro tema de interés es el de los movimientos de la Tierra en relación con las distintas estructuras de las que forma parte. Estamos acostumbrados a imaginar las trayectorias planetarias como una elipse alrededor del Sol en un sistema de referencia centrado en este último. Sin embargo, en un sistema de refe-



FIG. 4



Esquema de cómo se moverían los planetas de un sistema planetario similar al solar respecto a un sistema de referencia fijado en el centro galáctico. La estrella está en el centro del disco y a su alrededor aparecen las órbitas de los planetas. Conforme el conjunto se mueve hacia la derecha, la combinación entre este desplazamiento y el movimiento de cada planeta alrededor de la estrella hace que los planetas sigan trayectorias peculiares. Si estos dejaran una estela de humo como aviones a reacción pero lo bastante duradera, las citadas trayectorias aparecerían marcadas de manera similar a como lo están en la figura. La diferencia más clara en el trazado de las estelas de humo es la que se da entre el grupo de los planetas más cercanos a la estrella, y el de los más lejanos. Los primeros completan más vueltas alrededor de la estrella que los lejanos, a igual tiempo transcurrido, y eso queda reflejado en el trazado de las estelas.

rencia fijado en el centro galáctico su trayectoria sería más bien como una hélice (figura 4), ya que el Sol se mueve alrededor del centro galáctico. El plano de la órbita terrestre alrededor del Sol está inclinado aproximadamente unos  $60^\circ$  respecto al plano de la Vía Láctea. Aunque la órbita solar no está contenida en un plano sino que oscila debido a la compleja interacción gravitatoria con

las distintas partes de la galaxia, la dirección del movimiento solar no se desvía mucho del plano galáctico. La velocidad media de la Tierra en un sistema de referencia centrado en el Sol es de unos 30 km/s, mientras que la velocidad del Sol en un sistema fijado en el centro de la Vía Láctea es de unos 220 km/s. Además, hay que tener en cuenta que la Vía Láctea también se está moviendo a una velocidad aún mayor respecto a sistemas de referencia extragalácticos. Un punto de referencia singular es el Gran Atractor, situado en el centro del supercúmulo de Virgo, una anomalía gravitatoria que arrastra los cúmulos galácticos situados en un radio de cientos de millones de años-luz.



## La tipología de las galaxias

A principios del siglo xx Edwin Hubble estableció un sistema de clasificación básico para las galaxias. Casi un siglo más tarde, gracias al telescopio espacial nombrado en su honor, se siguen haciendo descubrimientos de nuevas tipologías cada vez más específicas.



Según las estimaciones más recientes, el número de galaxias en el universo observable se eleva a más de un billón. Sin embargo, tan solo una pequeña parte se ha podido detectar a partir de la observación directa, siendo el resto un valor deducido de la densidad galáctica en determinadas zonas del espacio profundo. En todo caso, a partir de las galaxias observadas directamente se han establecido unas tipologías de acuerdo a criterios morfológicos. Uno de los sistemas de clasificación más utilizados es la secuencia originalmente ideada por Edwin Hubble a principios del siglo xx, que las divide en tres tipos básicos: *elípticas*, *espirales* y *espirales barradas*. Aparte de los tipos básicos, se encuentran otras morfologías intermedias y completamente irregulares. También existen otros parámetros que sirven para describir y clasificar las galaxias, como su luminosidad, su tamaño o su número de estrellas.

Las galaxias pueden describirse asimismo a partir de otras características distintas a las consideradas en las clasificaciones morfológicas. Por ejemplo, aquellas con un ratio de formación estelar excepcionalmente alto se denominan *galaxias con brote estelar*. Estos brotes se acostumbran a asociar con episodios



puntuales entre galaxias que interactúan gravitatoriamente. Las interacciones gravitatorias pueden causar serias distorsiones en ellas, ocasionalmente acompañadas de intercambio de material interestelar. Si dos galaxias llegan a cruzarse, dependiendo de sus momentos relativos pueden atravesarse en lo que se conoce como *colisión galáctica* o fusionarse. La fusión se convierte en canibalismo cuando una de las dos galaxias es mucho más masiva que la otra. Por otro lado, aquellas galaxias cuyos núcleos presentan importantes emisiones de radiación electromagnética se denominan *galaxias con núcleo activo* o simplemente *galaxias activas*. Las más destacadas de este último grupo son los *quásares*, las *galaxias Seifert* y los *blazares*.

Finalmente, existen algunas galaxias que ocupan un lugar destacado en el imaginario colectivo. Dejando a un lado la nuestra, la Vía Láctea, la primera galaxia de cuya observación se tiene constancia es la galaxia de Andrómeda, aunque en el hemisferio sur las Nubes de Magallanes fueron con toda seguridad ya observadas por los pueblos prehistóricos. Las siguientes galaxias que gozan de mejor visibilidad desde la Tierra no fueron observadas hasta el siglo XVIII, cuando los telescopios llegaron a un nivel suficiente de desarrollo. Uno de los primeros catálogos de objetos astronómicos entre los que había una treintena de galaxias fue el recopilado por Charles Messier. Si bien es cierto que hoy en día se ha recogido información detallada de multitud de galaxias, las incluidas en el catálogo Messier siguen siendo las que nos ofrecen mejores posibilidades de observación.

## CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA

El número de galaxias en el universo observable se basa en estimaciones realizadas mediante modelos matemáticos, así que muchas de ellas, entre ese billón, ni tan solo han sido observadas directamente. Por tanto, los conocimientos que tenemos sobre las galaxias pueden verse enormemente alterados en el futuro, ya que más del 90% no han sido estudiadas todavía. Su observación con la próxima generación de telescopios posibilitará no

solo una mejor comprensión de su naturaleza, sino también un conocimiento más profundo de la historia del universo. El estudio de las galaxias es pues un campo de la astronomía que está en los pasos iniciales de su desarrollo y por tanto sujeto a una constante revisión. Una de las primeras aproximaciones que se han realizado es la búsqueda de características comunes y la definición de tipos para realizar clasificaciones, lo cual no pudo llevarse a cabo hasta la identificación de un número suficiente de galaxias. Uno de los primeros en realizar una clasificación detallada de este tipo fue Edwin Hubble, uno de los astrónomos más destacados de todos los tiempos y considerado por muchos el padre de la cosmología observacional moderna.

La *secuencia de Hubble*, originalmente propuesta en la primera mitad del siglo XX, es la clasificación más antigua utilizada por los astrónomos en la actualidad. El criterio que usa para definir los tipos es la morfología, resultando tres grupos básicos de galaxias: elípticas E, espirales S y espirales barradas SB. A su vez, cada uno de los tipos básicos se divide en varios subtipos. En el caso de las galaxias elípticas, los subtipos desde el 0 hasta el 7 corresponden a la apariencia de las galaxias y no a su forma real. Es decir, su forma real es un elipsoide, pero lo que se clasifica es la forma elíptica aparente que presentan vistas desde la Tierra. El subtipo E0 indica una apariencia casi circular y el subtipo E7 una apariencia elíptica con gran excentricidad. En el caso de las galaxias espirales y espirales barradas, los subtipos a, b, y c responden a la separación de los brazos. O sea, el subtipo a indica unos brazos muy juntos y el subtipo c unos brazos muy separados. Aquellas galaxias cuyos brazos presentan separaciones intermedias se pueden clasificar como subtipos intermedios ab o bc. Además, el sistema de clasificación de Hubble incluía también otros tipos morfológicos, como las galaxias lenticulares S0 o irregulares Irr.

La secuencia de Hubble original ha sido extendida diversas veces para un mejor ajuste con las nuevas observaciones que se han ido sucediendo desde su aparición. Una de las extensiones más aceptadas en la actualidad es la introducida por Gérard de Vaucouleurs (véase la imagen de las páginas 84-85). En este sis-

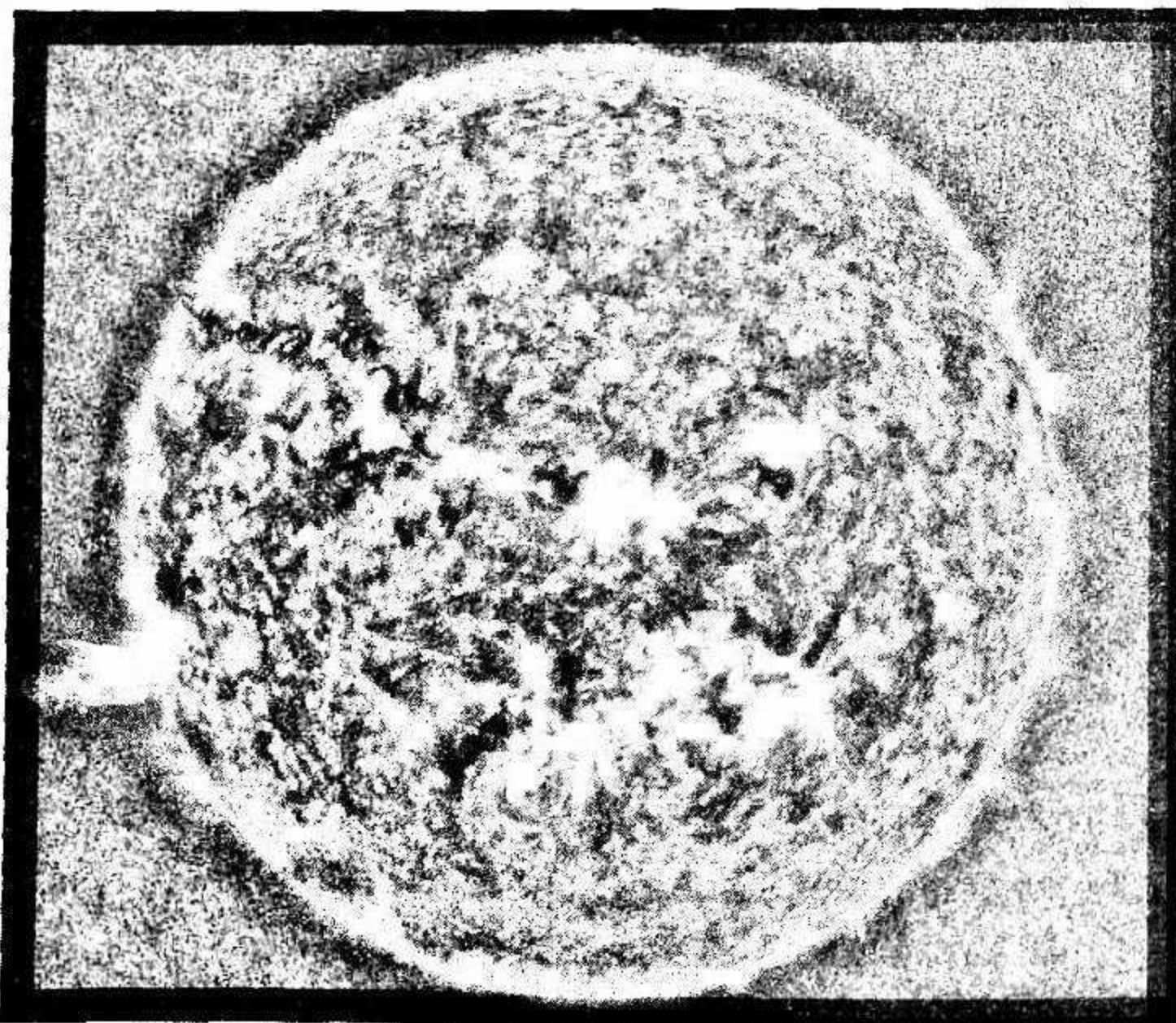


## TIPOS ESPECTRALES ESTELARES

La temperatura de las estrellas se puede deducir de su espectro electromagnético: cuanto más caliente, mayor es la frecuencia con intensidad máxima. Es decir, las azuladas acostumbran a tener mayor temperatura superficial que las rojizas, aunque nos resulte raro por la asociación tradicional de lo azulado con lo frío y lo rojizo con lo caliente. En cuanto a las otras características, como luminosidad, masa y tamaño, responden a unos patrones que se han podido clasificar en tipos espectrales gracias a décadas de observación. La clasificación espectral de Harvard, gestada a finales del siglo XIX en esa universidad, es la más importante. Los tipos espectrales se relacionan con las características de las estrellas mediante los *diagramas de Hertzsprung-Russell*.

### Distribución en el diagrama

En el eje vertical de la figura se sitúan los valores de luminosidad relativa al Sol y en el horizontal la temperatura superficial en kelvins, teniendo en cuenta que 0 K equivale, aproximadamente, a  $-273^{\circ}\text{C}$ . Las estrellas pueden variar su luminosidad y temperatura a lo largo de su vida, pero la mayoría se mueven generalmente en la franja diagonal conocida como *secuencia principal*. Las estrellas amarillas de tamaño y luminosidad medios como el Sol se encuentran en el centro. Las estrellas azules grandes y luminosas se encuentran arriba a la izquierda, mientras que las rojas pequeñas y tenues se hallan abajo a la derecha. Además, aparecen otras tres zonas diferenciadas: las supergigantes, las gigantes y las enanas blancas. Las primeras destacan por su alta luminosidad y baja temperatura, mientras que las últimas lo hacen por su baja luminosidad y alta temperatura.



El Sol es una estrella de clase espectral G y la etapa de su ciclo de vida en la que se halla es la secuencia principal.

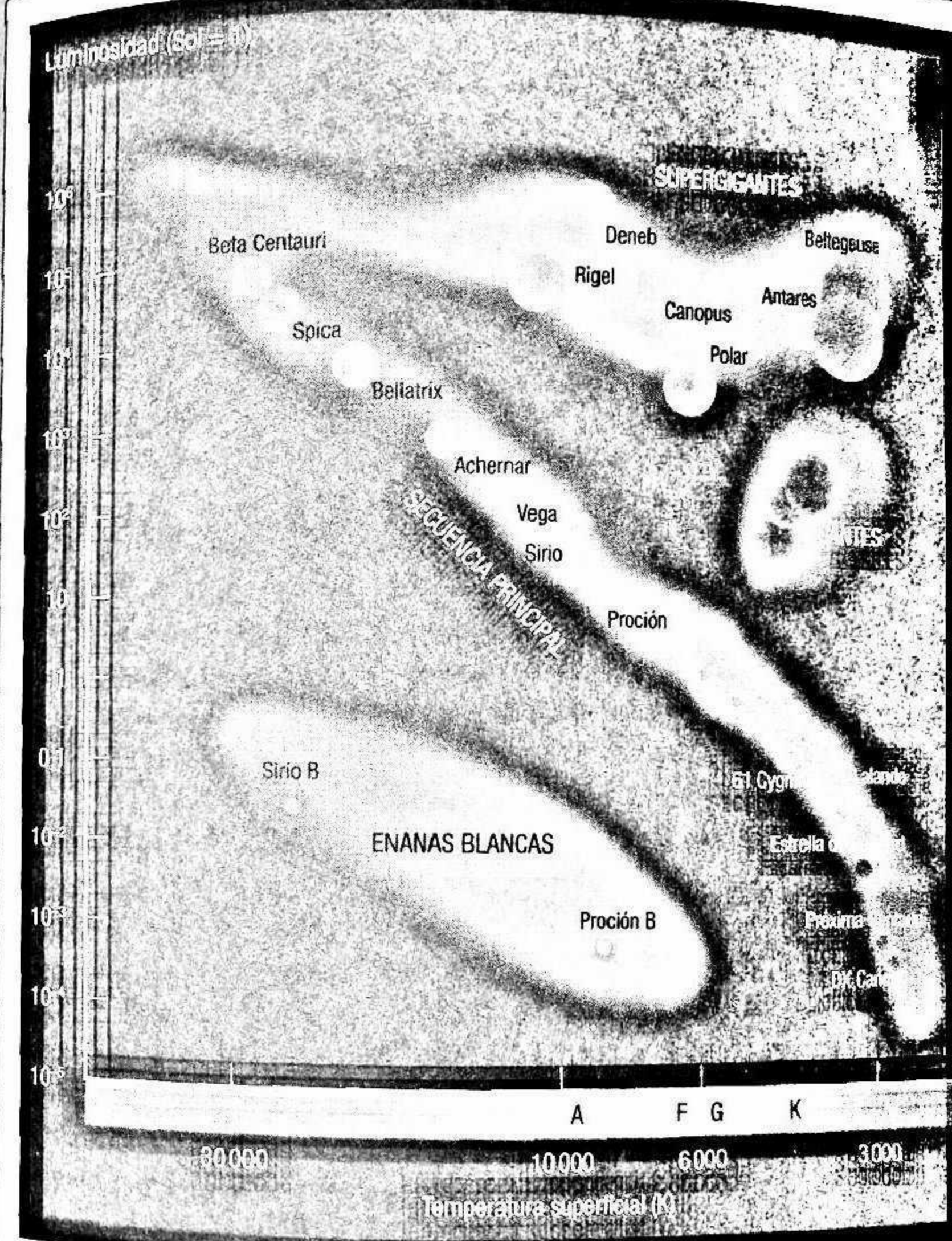
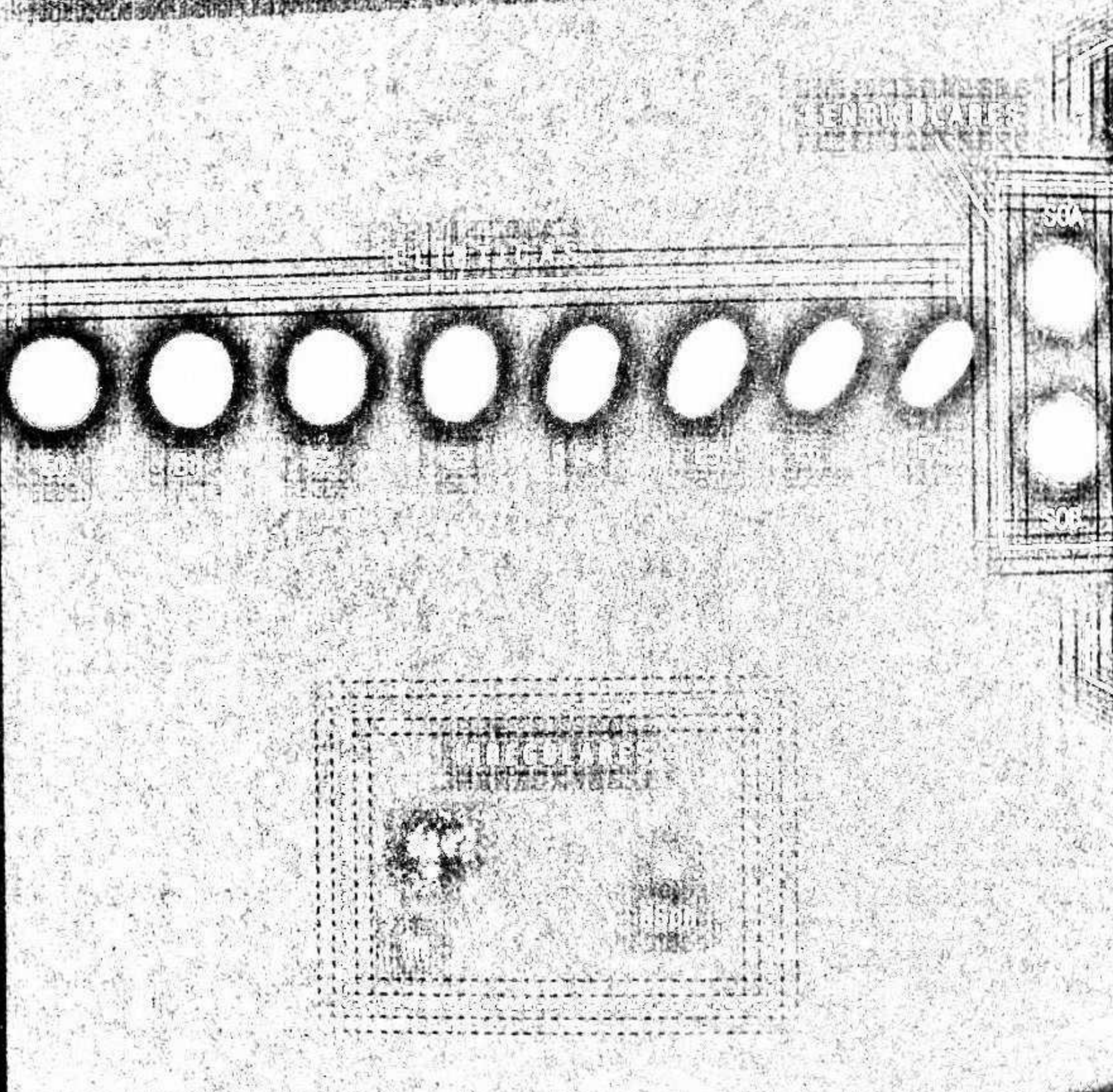


Imagen de un diagrama de Hertzsprung-Russell, en que se muestran varias estrellas de la Vía Láctea. La fila de letras en el borde inferior indica los tipos espectrales de las estrellas, ordenados desde el O, que corresponde al rango de las temperaturas más altas, hasta el M, que corresponde al de las más bajas.

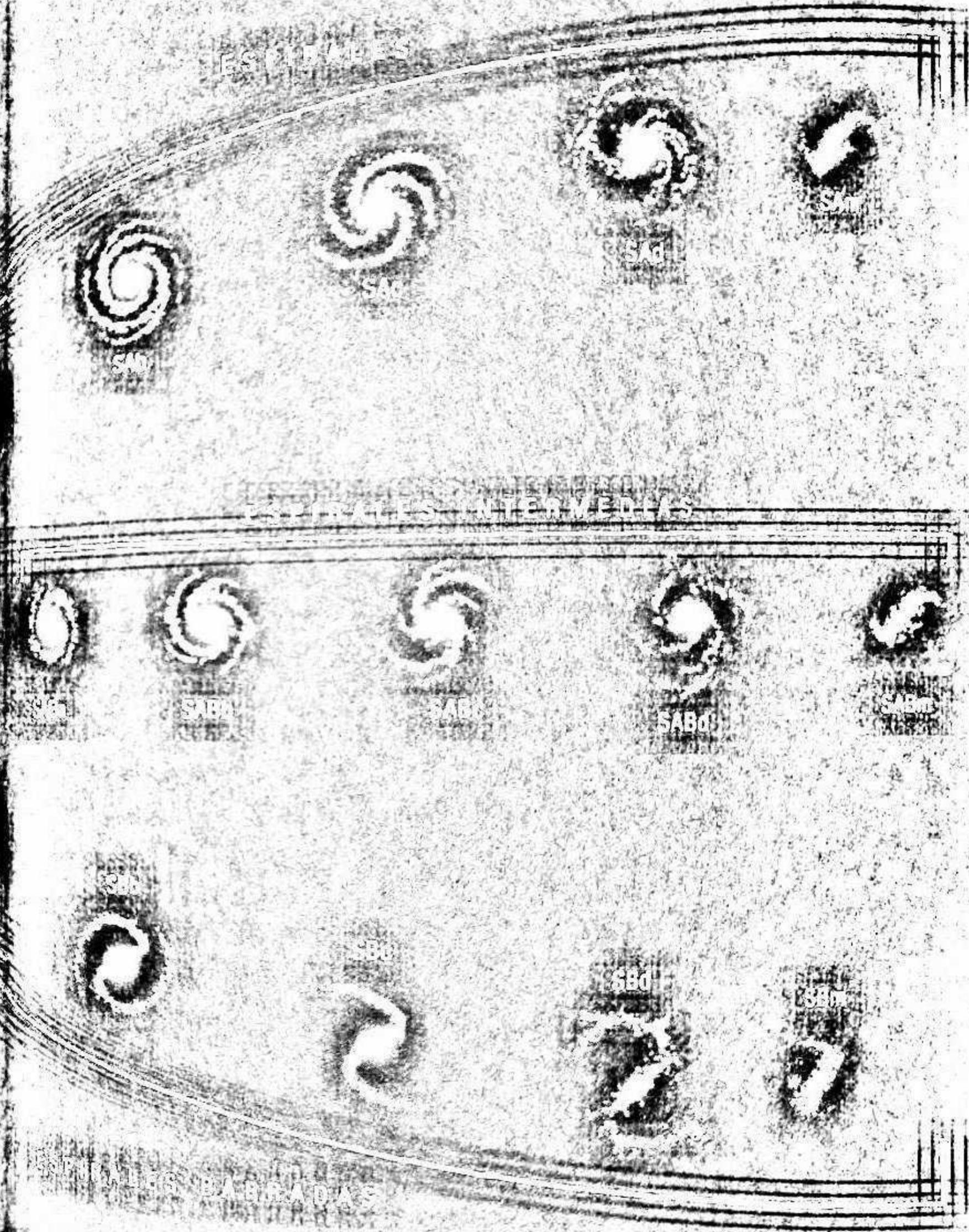


## LOS TIPOS PRINCIPALES DE GALAXIAS

En esta imagen se muestra el catálogo básico de tipos y subtipos principales de galaxias, según el sistema de clasificación Hubble de Vaucoleurs. Los nombres de los tipos de galaxias derivan de la apariencia que suelen presentar. En el caso de las elípticas, el subtipo E0 corresponde a una galaxia esencialmente esférica. Esta forma va volviéndose cada vez más ovalada a medida que se suceden los números siguientes con los que se identifica a los demás subtipos. Las lenticulares ostentan rasgos intermedios entre los de las elípticas y los de las espirales. De entre las características que diferencian a los distintos subtipos de espirales, espirales barradas y espirales intermedias, una de las principales es la separación entre sus brazos. Las letras a, b, c, d señalan cómo son sus brazos y núcleos (las a tienen los brazos y el núcleo bien definidos, y en cambio las d tienen un núcleo difuso y los brazos fragmentados). A las barradas se las llama así por la estructura en forma de barra que se observa en su zona central. Las irregulares reciben este nombre por su forma irregular, que no encaja en ninguno de los tipos principales clásicos bien definidos.



## ESPIRALES





tema, el símbolo de las galaxias espirales no barradas cambia de S a SA. El símbolo de las espirales barradas, por el contrario, se mantiene en SB. También aparece un nuevo tipo que agrupa aquellas galaxias que presentan características intermedias entre espirales barradas y no barradas bajo el símbolo SAB. Otro refinamiento introducido por este sistema tiene que ver con los anillos: las galaxias que tienen anillos llevan el símbolo (r), las que no los tienen (s) y las de transición (rs). En cuanto a los subtipos de galaxias espirales, introduce varios nuevos: d para las que tienen un núcleo central muy poco definido y brazos muy fragmentados, y m para aquellas sin un núcleo central y de aspecto irregular. Por último, las galaxias muy irregulares pasan a formar parte del tipo I y sus subtipos. Estos nuevos tipos y subtipos clasifican muchas de las galaxias que según la secuencia de Hubble original pertenecían al tipo de galaxias irregulares Irr. Además, el subtipo d recoge algunas de las que originalmente pertenecían al subtipo c. Otros símbolos que se han ido incorporando al sistema son d para las galaxias enanas, g para las gigantes o Sph para las casi esféricas. Según el sistema de Hubble-de Vaucouleurs, una galaxia con una estructura barrada muy poco definida, un anillo y brazos ligeramente fragmentados sería del tipo SAB(r)c.

Aparte de la simbología usada en el sistema de clasificación de Hubble-de Vaucouleurs, existen otras distintas como por ejemplo la empleada en el sistema del observatorio Yerkes, desarrollado en él, en la Universidad de Chicago, a mediados del siglo XX. Este último usa tres parámetros principales: tipo espectral integrado de las estrellas, tipo morfológico e inclinación respecto al eje de observación. Los símbolos para los tipos espectrales van desde A hasta K, de forma análoga a los de las estrellas individuales. Los símbolos de los tipos morfológicos son similares pero distintos a los de Hubble-de Vaucouleurs e incluyen el tipo D para las galaxias difusas sin una estructura predominante, que se acostumbra a usar para clasificar las galaxias elípticas supergigantes. Finalmente, los símbolos de la inclinación van desde 1 hasta 7, correspondiendo el primero al eje en dirección a la Tierra y el último al eje en perpendicular. Por ejemplo, la galaxia de Andró-

meda, que según la clasificación de Hubble-de Vaucouleurs es de tipo SA(s)b, según la de Yerkes es de tipo kS5. Además, se usan también otros parámetros para describir las galaxias, como por ejemplo su número de estrellas o su tamaño. Sin embargo, estas características no son siempre fáciles de determinar, por lo que se terminan usando otras más relacionadas con su observación, como el tamaño y la luminosidad aparentes o el desplazamiento del espectro electromagnético.

El número de estrellas de una galaxia se puede encontrar en un rango que va desde unos pocos cientos de millones hasta cientos de billones y su longitud desde centenares hasta millones de años-luz. En cuanto a los tipos básicos según su morfología, las galaxias elípticas han estado consideradas hasta la fecha como las que presentan una mayor diversidad en número de estrellas y tamaños. Sin embargo, es preciso señalar que recientemente se han identificado galaxias espirales que pueden competir con las mayores elípticas. En luminosidad, el primer puesto es para las galaxias infrarrojas extremadamente luminosas, cuya naturaleza parece ser más bien próxima a las espirales, aunque pueden llegar a liberar diez mil veces más energía que la Vía Láctea. En cuanto a las composiciones, en un extremo encontramos las galaxias elípticas formadas mayoritariamente por estrellas viejas y en el otro las galaxias irregulares con una población estelar más joven. En las galaxias espirales se da una situación intermedia, en la que existe un disco con una cantidad importante de estrellas jóvenes, mientras que en su núcleo la población estelar está más envejecida.

En cuanto a los cúmulos galácticos, existen distintas tipologías, siendo el sistema de clasificaciones de *Bautz-Morgan* uno de los más utilizados. Este sistema establece tres tipos básicos según la presencia o no de una galaxia dominante en el centro del cúmulo: tipo I, tipo II y tipo III. En un extremo, los cúmulos de tipo I contienen una galaxia mucho más brillante que las demás, como el de Fornax, dominado por la mayor galaxia conocida hasta el momento: IC 1101. Son ricos en galaxias elípticas y presentan una simetría esférica con una importante concentración de masa en su centro. En el otro extremo, los cúmulos de



tipo III no cuentan con ninguna galaxia dominante, como sucede en el de Virgo. Son ricos en galaxias espirales y carecen de simetría con una escasa concentración de masa en su centro. En un caso intermedio entre los dos anteriores, encontramos los cúmulos de tipo II, como el de Coma, cuya región central está dominada por dos galaxias supergigantes. En cuanto a la identificación de los distintos cúmulos, también existen catálogos específicos, como el de *Abell*, que consta de varios miles de cúmulos que cubren todo el cielo. El cúmulo de Virgo está excluido de este catálogo por ocupar un área celeste demasiado grande, pero los cúmulos de Fornax y Coma tienen los identificadores *Abell* S0373 y *Abell* 1656, respectivamente.

### Galaxias elípticas

Se caracterizan por no contar con una estructura bien marcada. Las estrellas orbitan aleatoriamente alrededor de un centro de gravedad, distribuidas en las tres dimensiones formando un elipsoide. Así pues, sea cual sea la orientación de sus ejes, siempre nos aparecen en forma elíptica. El movimiento de las estrellas alrededor del centro se produce aleatoriamente en todas las direcciones, por lo que el momento angular total es insignificante. Suelen tener normalmente poco material interestelar, pocos cúmulos abiertos y un bajo ratio de formación estelar, en comparación con las galaxias espirales. Esto conlleva que la población de estrellas de las galaxias elípticas esté relativamente envejecida, es decir, que la mayoría se encuentre en estados avanzados de su evolución. Además, su contenido en átomos de elementos pesados es relativamente bajo, lo cual concuerda con su baja actividad. En otras palabras, la formación de estrellas solo se da en sus estadios iniciales con escasa recombinación posterior. Todas estas características son comunes a casi todas las galaxias elípticas, pero hay que señalar que existen algunas excepciones, como es el caso de NGC 1275, que presenta una importante actividad. A día de hoy, las galaxias elípticas son las que abarcan una mayor variedad en número de estrellas y tamaños. Van des-

de las enanas casi esféricas, parecidas a los cúmulos globulares pero muy ricas en materia oscura (una forma de materia distinta a la normal y de la cual se sabe muy poco), hasta las supergigantes, que dominan los grandes cúmulos galácticos, entre las que podemos encontrar las mayores y más brillantes galaxias del universo.

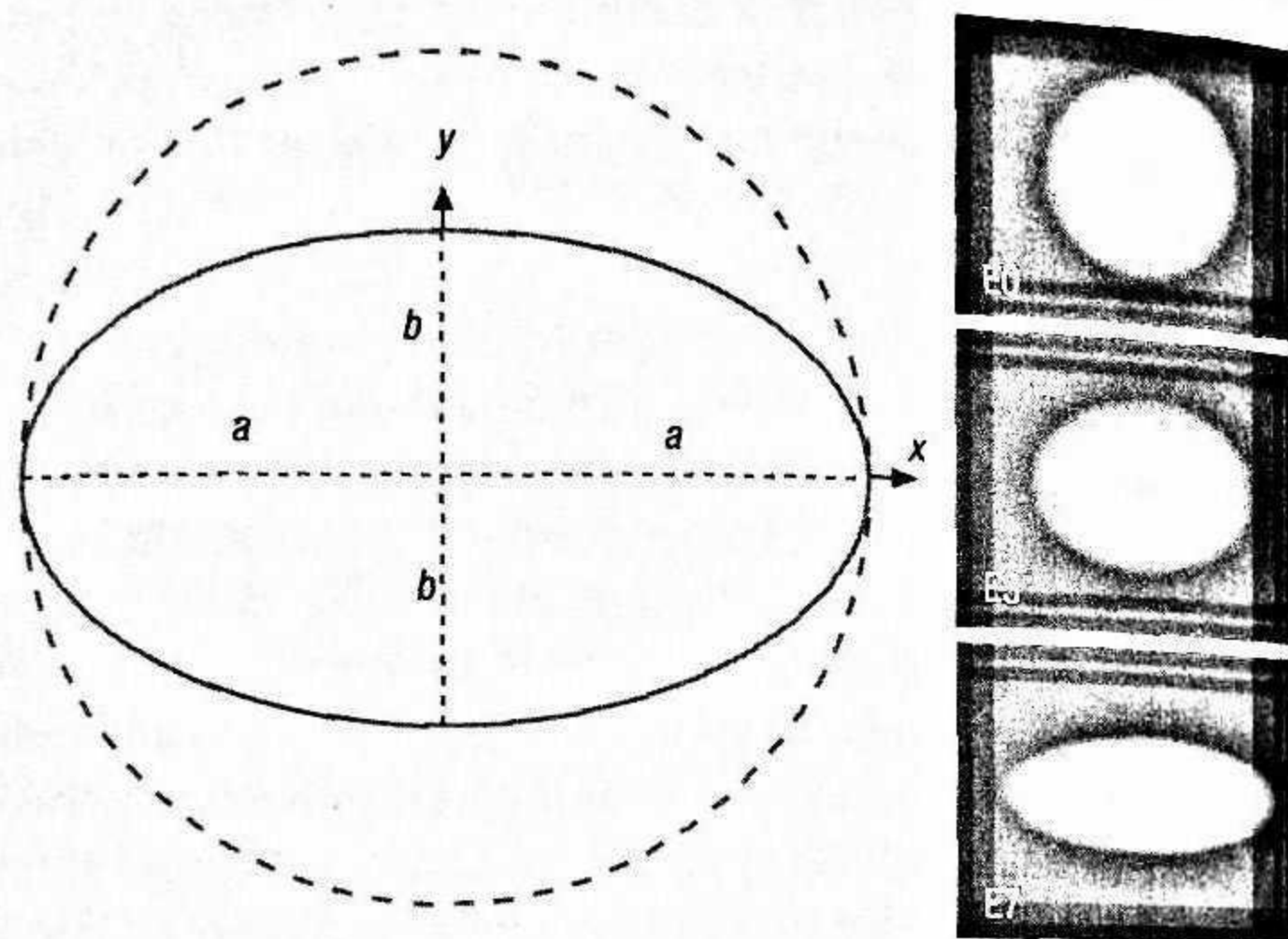
Las galaxias elípticas, como ya hemos visto, se clasifican según el achatamiento de la elipse aparente que vemos y no del elipsoide que constituye su forma tridimensional. Esto es así porque muchas veces resulta difícil determinarla exactamente, así que existe un cierto grado de incertidumbre en las clasificaciones en lo que respecta a la forma tridimensional. Es decir, la apariencia no solo depende de la forma sino también del ángulo con el que vemos las galaxias, de modo que algunas que contemplamos como casi circulares no deben ser necesariamente esféricas, de lo cual ya era consciente el propio Hubble. Pensemos en una galaxia en forma de esferoide oblato (como una lenteja) con el eje de simetría mirando hacia la Tierra: la forma aparente que percibiríamos es la circular. Si bien quizá podamos llegar a intuir su forma aplanada, difícilmente sabremos en qué medida lo está. Como se puede ver en la figura 1, los subtipos de galaxias elípticas van desde el E0, con una apariencia casi circular, hasta el E7, con una apariencia bastante alongada. Parece ser que las galaxias más alongadas que E7 tenderían a dispersarse y tomar volumen. El subtipo más común observado hasta el momento es el E3.

En cuanto a sus dimensiones, hasta hace pocas décadas se creyó que el rango de valores de las masas galácticas oscilaba de forma bastante limitada alrededor de la masa de la Vía Láctea. Sin embargo, el rango considerado ha aumentado de forma espectacular en las últimas décadas gracias a la mejora de los medios de observación, que han posibilitado una mejor estimación de las propiedades de las galaxias conocidas y el descubrimiento de nuevas. Actualmente, sabemos que existen galaxias elípticas enanas y galaxias elípticas supergigantes millones de veces más masivas que las primeras. Las enanas pueden llegar a masas del orden de un millón de veces la solar, siendo apenas más masivas que los cúmulos globulares. Su número de estrellas es relativa-



FIG. 1

Esquema que muestra varios subtipos de las galaxias elípticas de acuerdo a la forma de la elipse que vemos cuando las observamos. El número  $n$  que sigue a la E en el nombre del subtipo está determinado por el achatamiento de la elipse, es decir,  $n = 10 \cdot (a - b)/a$ , siendo  $a$  su semieje mayor y  $b$  su semieje menor. El conjunto se representa con coordenadas cartesianas  $(x, y)$ .



mente bajo, por lo que resultan muy difíciles de detectar. Esto tiene como consecuencia que solo somos capaces de localizar galaxias enanas en nuestra vecindad inmediata. El número de galaxias en el universo es pues difícil de estimar solamente con métodos observacionales y se necesitan modelos matemáticos adicionales. De todas formas, la masa de las galaxias enanas es muy baja y su contribución a la masa total del universo solamente sería apreciable si su número fuera inmenso. En el extremo opuesto, las supergigantes pueden alcanzar masas del orden de diez billones de veces la solar. Su elevadísimo número de estrellas hace que sean muy luminosas. Sin embargo, las galaxias de este tipo se encuentran muy lejos de nosotros y hasta hace pocas décadas no fue posible identificarlas con éxito. Por ejemplo, aunque la mayor galaxia conocida hasta el momento, IC 1101, había sido ya observada a finales del siglo XVII por William Herschel, no se pudieron determinar sus dimensiones con precisión hasta finales del siglo XX. Actualmente se estima que su longitud es decenas de veces la de la Vía Láctea.

Para la clasificación de las galaxias elípticas supergigantes se usan a veces los símbolos D o cD prestados por el sistema de Yerkes. La D indica que la galaxia tiene aspecto difuso y la c hace referencia a su gran tamaño. Las galaxias de ambos tipos se caracterizan por estar envueltas por un gran halo difuso de estrellas. Las galaxias cD son consideradas las mayores conocidas, con longitudes superiores al millón de años-luz. Se encuentran en el centro de ciertos cúmulos galácticos, rodeadas de una multitud de galaxias menores que las alimentan progresivamente transfiriéndoles masa cada vez que se acercan. Por ese motivo son también conocidas como *galaxias centrales dominantes*, aunque como acabamos de ver el origen de las siglas cD es otro. Como ejemplo de este último tipo podemos citar la galaxia M87, una de las mayores entre las cercanas a nosotros, y la mencionada galaxia IC 1101 (figura 2).

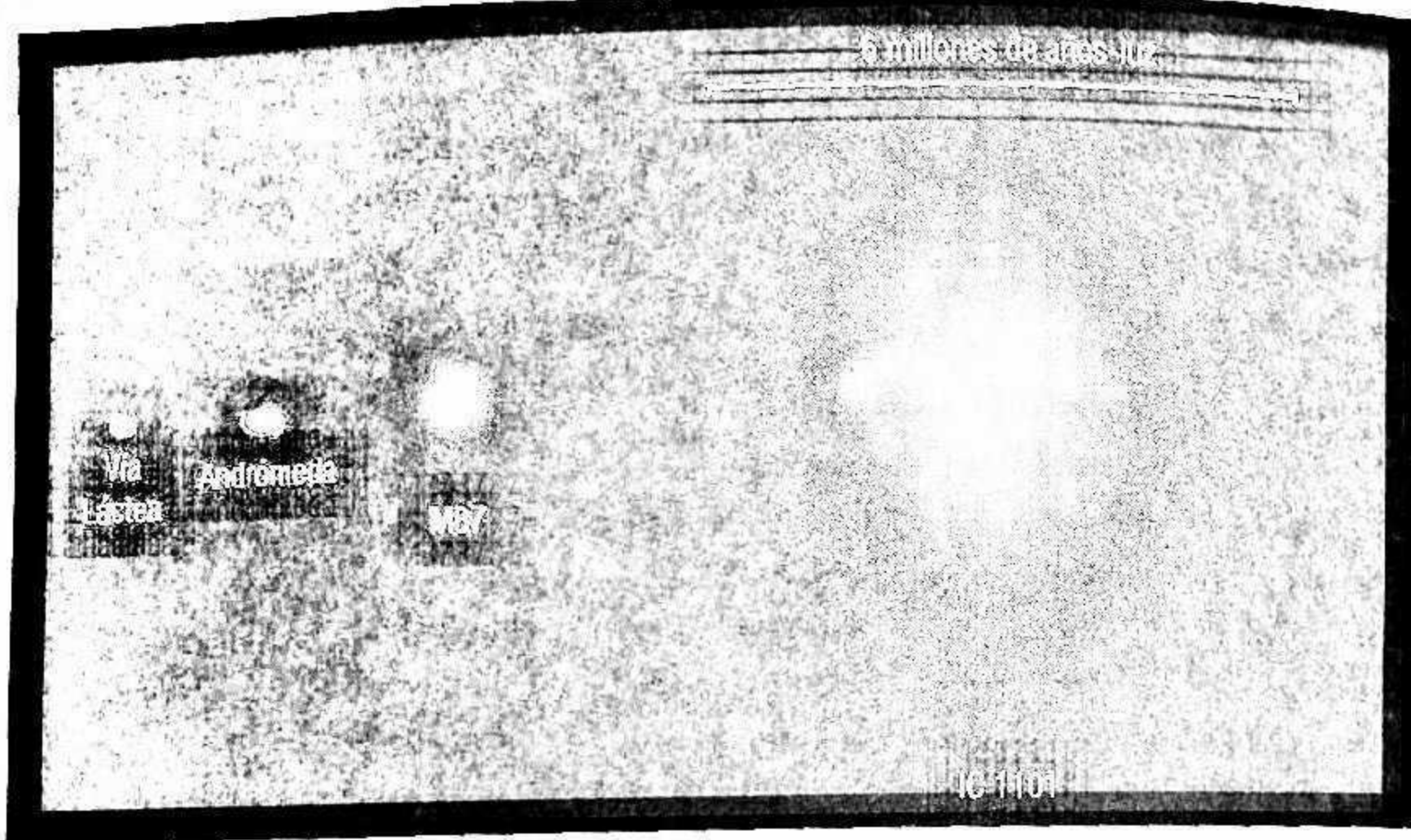
Siempre pienso en el espacio-tiempo como en la verdadera sustancia del espacio, y en las galaxias y las estrellas como en la espuma del océano.

GEORGE SMOOT

Las galaxias elípticas gigantes acostumbran a tener un amplio sistema de cúmulos globulares y una gran cantidad de galaxias satélites. Esto se interpreta como que son el resultado de *canibalismo galáctico*, es decir, la absorción de galaxias menores. Este fenómeno también se da en las galaxias espirales como la Vía Láctea, que actualmente está en proceso de absorber un par de galaxias enanas. Sin embargo, el historial de absorciones y fusiones de las galaxias elípticas gigantes es probablemente mucho más complejo. En particular, se cree que el proceso mediante el cual se generan implica la fricción dinámica: la galaxia atrae detrás de ella un séquito de galaxias menores y materia oscura en su movimiento a través del cúmulo. Este movimiento se ve desacelerado por efecto de la atracción gravitatoria del séquito, cayendo así lentamente en espiral hacia el centro del cúmulo. Finalmente, llega un momento en que las estrellas, el gas, el polvo, y la materia oscura del séquito se unen a la galaxia principal. Este proceso se repite con nuevas galaxias menores hasta la formación del gran halo difuso que



FIG. 2



Esquema comparativo de los tamaños de la mayor galaxia conocida hasta el momento, IC 1101, en relación con la Vía Láctea, la galaxia de Andrómeda y M87.

caracteriza a las galaxias elípticas gigantes. Los restos de las galaxias absorbidas y fusionadas pueden verse como estructuras de estrellas, gas y polvo en el halo. Además, se cree que existen otros procesos que contribuyen al crecimiento de algunas galaxias elípticas gigantes, como por ejemplo la absorción de gas, que al acumularse en la región central se comprime dando lugar al nacimiento de nuevas estrellas. Si bien no se han detectado galaxias cD aisladas, sí se han localizado grupos de galaxias rodeadas por un gran halo de gas caliente. Se ha especulado que estas estructuras podrían dar lugar a galaxias cD alrededor de las cuales se aglutinarían nuevos cúmulos galácticos con posterioridad.

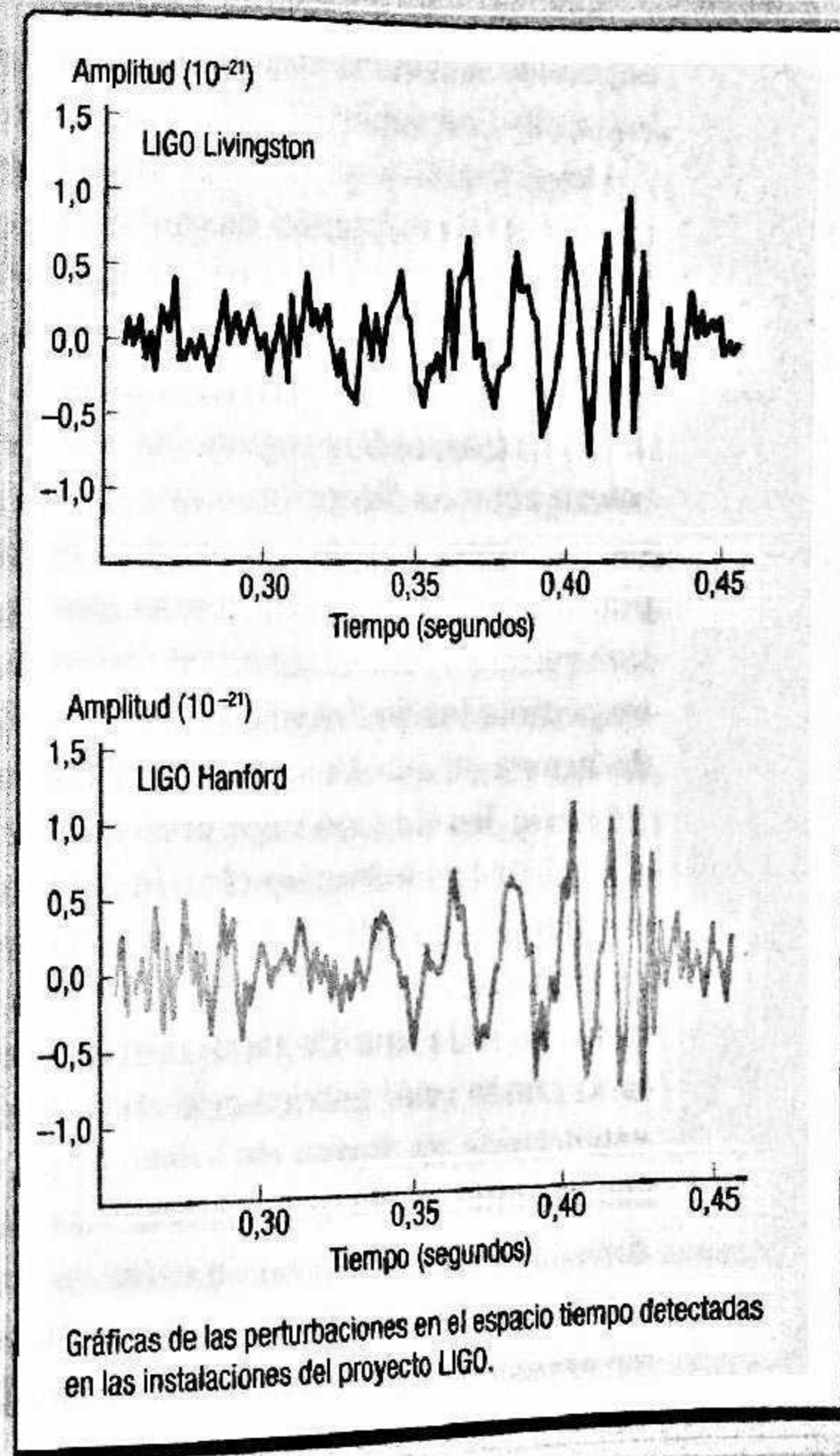
La fusión, acumulación y ensamblaje de galaxias habría sido al parecer más común en los estadios iniciales del universo que en la actualidad. Sin embargo, aún podemos ver multitud de galaxias vinculadas gravitatoriamente sin posibilidad de separarse,

## LAS ONDAS GRAVITATORIAS

Las llamadas *ondas gravitatorias* son perturbaciones en el espacio-tiempo producidas por un cuerpo masivo acelerado que se propagan a la velocidad de la luz según la teoría de la relatividad de Einstein. Si bien cualquier cuerpo masivo acelerado es susceptible de producir ondas gravitatorias, estas son difícilísimas de detectar desde la Tierra debido a la magnitud del campo gravitatorio de nuestro planeta. La primera detección de una onda gravitatoria tuvo lugar gracias al proyecto LIGO, publicándose el resultado en 2016, tras meses de análisis estadístico de los datos obtenidos en sus dos instalaciones.

### La señal GW150914

El 14 de septiembre de 2015, las instalaciones del proyecto LIGO en Livingston (Luisiana) y en Hanford (Washington) detectaron con 7 milisegundos de diferencia una señal de 0,2 segundos. Durante ese tiempo se produjeron unos ocho ciclos en los que la frecuencia aumentó de 35 a 150 Hz, momento en que se alcanzó la máxima amplitud. Esta señal (véase la figura) se ha interpretado como la onda producida en los instantes previos a la fusión de dos agujeros negros, mientras caían en espiral hacia su centro de masas. Según se estima, la velocidad relativa de los agujeros negros aumentó del 30% al 60% de la velocidad de la luz. El decaimiento de la onda correspondería a la oscilación amortiguada del agujero negro fusionado.





que con probabilidad acabarán fusionándose. El proceso de fusión entre galaxias no se comprende por completo, existiendo distintas hipótesis con las que se intenta explicarlo basándose en las observaciones. Por ejemplo, se cree que cuando se fusionan dos galaxias de un tamaño similar, la resultante no se parece a ninguna de las originales, sino que probablemente acaba siendo una galaxia de características distintas. Por ejemplo, sabemos que la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda, ambas espirales, están acercándose y probablemente van a acabar encontrándose dentro de varios miles de millones de años. Pues bien, existen hipótesis según las cuales el resultado de su fusión será una galaxia elíptica supergigante.

Las galaxias elípticas no tienen formas perfectamente regulares, así que en función de cuánto se desvían de una elipse pueden agruparse en dos tipos básicos: *tipo caja* y *tipo disco*. Las de tipo caja suelen ser mayores, con una forma más irregular que viene determinada por una rotación galáctica más lenta y una distribución menos regular de las velocidades estelares, mayores en algunas direcciones que en otras. Las de tipo disco suelen ser menores, con una forma más regular que viene determinada por una rotación galáctica más rápida y velocidades similares de sus estrellas. Otras peculiaridades de las galaxias de tipo caja respecto a las de tipo disco son que no tienen una concentración de luz en su núcleo y que contienen estrellas algo más viejas. Además, las de tipo caja presentan más habitualmente fuentes de radiación en frecuencias de radio y emisiones de rayos X, estas últimas debidas a la presencia de gas caliente en el medio interestelar.

En más de una de cada diez galaxias elípticas se han detectado zonas concéntricas de estrellas a su alrededor, formando estructuras en forma de «cáscaras». Uno de los ejemplos más interesantes es la galaxia NGC 3923, a cuyo alrededor se han detectado una veintena de estas estructuras. Se trata de una peculiaridad de las galaxias elípticas que no se ha podido detectar en las espirales. Las cáscaras pueden aparecer situadas de forma simétrica a ambos lados de la galaxia y su origen podría explicarse como el resultado de una fusión. Según esta idea, los centros

de las galaxias empezarían a oscilar en torno a un centro de gravedad común al acercarse. Este fenómeno sería el causante de las perturbaciones que en última instancia tendrían como consecuencia las estructuras en cáscara, de forma análoga a cómo se cree que funcionan las ondas gravitatorias. Vistas desde la Tierra, las cáscaras tienen una apariencia de halos alrededor de la galaxia con un espectro más azulado. Se piensa que podrían ser más comunes de lo que se ha observado hasta el momento.

Finalmente, durante mucho tiempo se ha asociado el bajo ratio de formación estelar en las galaxias elípticas a la escasez de gas en comparación a las galaxias espirales. Sin embargo, recientemente se han detectado depósitos importantes de gas en una parte de las galaxias elípticas, así que para estos casos hay que buscar explicaciones más complejas. Se ha especulado para ellos que la escasa formación estelar tendría que ver con la presencia de agujeros negros centrales supermasivos que las inhibirían al impedir que el gas se enfriara lo suficiente. Estos agujeros negros estarían presentes en todas las galaxias elípticas y su tamaño aumentaría con el de la galaxia según trabajos basados en las más próximas. El estudio de los agujeros negros no es una cosa sencilla, ya que a día de hoy es imposible detectarlos de forma directa y hay que hacerlo a través de sus efectos, como puede ser la radiación electromagnética emitida por la masa acelerada a su alrededor. Aun con las limitaciones que eso supone, parece que se está avanzando en la comprensión de su papel en la formación y desarrollo de las galaxias, considerado cada vez más relevante.

### Galaxias espirales y espirales barradas

Estas se caracterizan por tener una estructura bien definida en torno a un plano principal, en cuyas cercanías orbitan la mayoría de las estrellas formando un disco alrededor del centro galáctico. Deben su nombre a los diversos brazos en forma de espiral que se expanden desde su núcleo, y que pueden tener características similares a los de las galaxias elípticas. En el res-

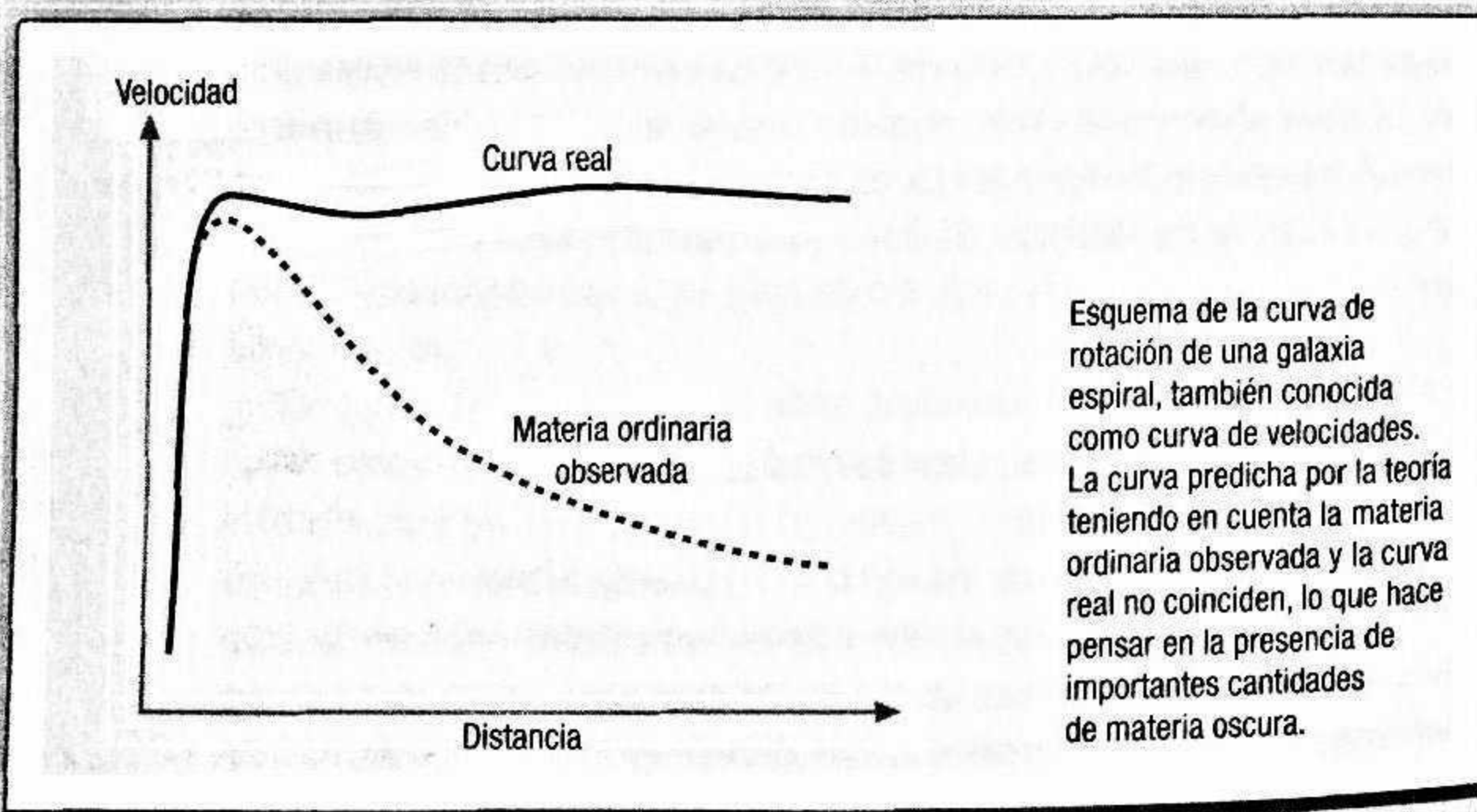


## LA MATERIA OSCURA

Lo que denominamos materia oscura es un hipotético tipo que se distingue de la materia ordinaria, en tanto en cuanto no interactúa con la radiación electromagnética y no puede ser detectada mediante los telescopios ni los radiotelescopios, por lo que no se ha podido observar directamente. Su existencia se deduce de sus efectos gravitatorios sobre la materia ordinaria, como por ejemplo la desviación de los rayos de luz de objetos más alejados. En el caso de las galaxias espirales, uno de los fenómenos que pueden encontrar una explicación en la existencia de la materia oscura es la distribución de las velocidades estelares. Según algunas estimaciones, la materia oscura es entre cinco y seis veces más abundante en el universo que la materia normal. Hay diversos experimentos en marcha en los cuales se intenta identificar de qué exóticas partículas está hecha la materia oscura, pero no se descartan otras posibilidades.

### Curva de velocidades

La curva de rotación galáctica es la curva de la función que relaciona las velocidades de las estrellas de una galaxia con la distancia a su centro. Se presenta normalmente en una gráfica (véase la figura) donde se muestran las velocidades en el eje vertical y las distancias en el eje horizontal. Las primeras curvas de rotación de galaxias espirales obtenidas con mediciones precisas fueron publicadas en la segunda mitad del siglo xx por Vera Rubin, siendo uno de sus resultados que la mayoría de las estrellas orbitan casi a la misma velocidad. Esto entra en contradicción con la ley de la gravedad, según la cual las velocidades de las estrellas lejanas tendrían que ser más bajas que las de las estrellas cercanas, al menos con la distribución de masas observada. Este hecho fue interpretado como la existencia de una importante cantidad de materia oscura que escapa a nuestra observación directa.

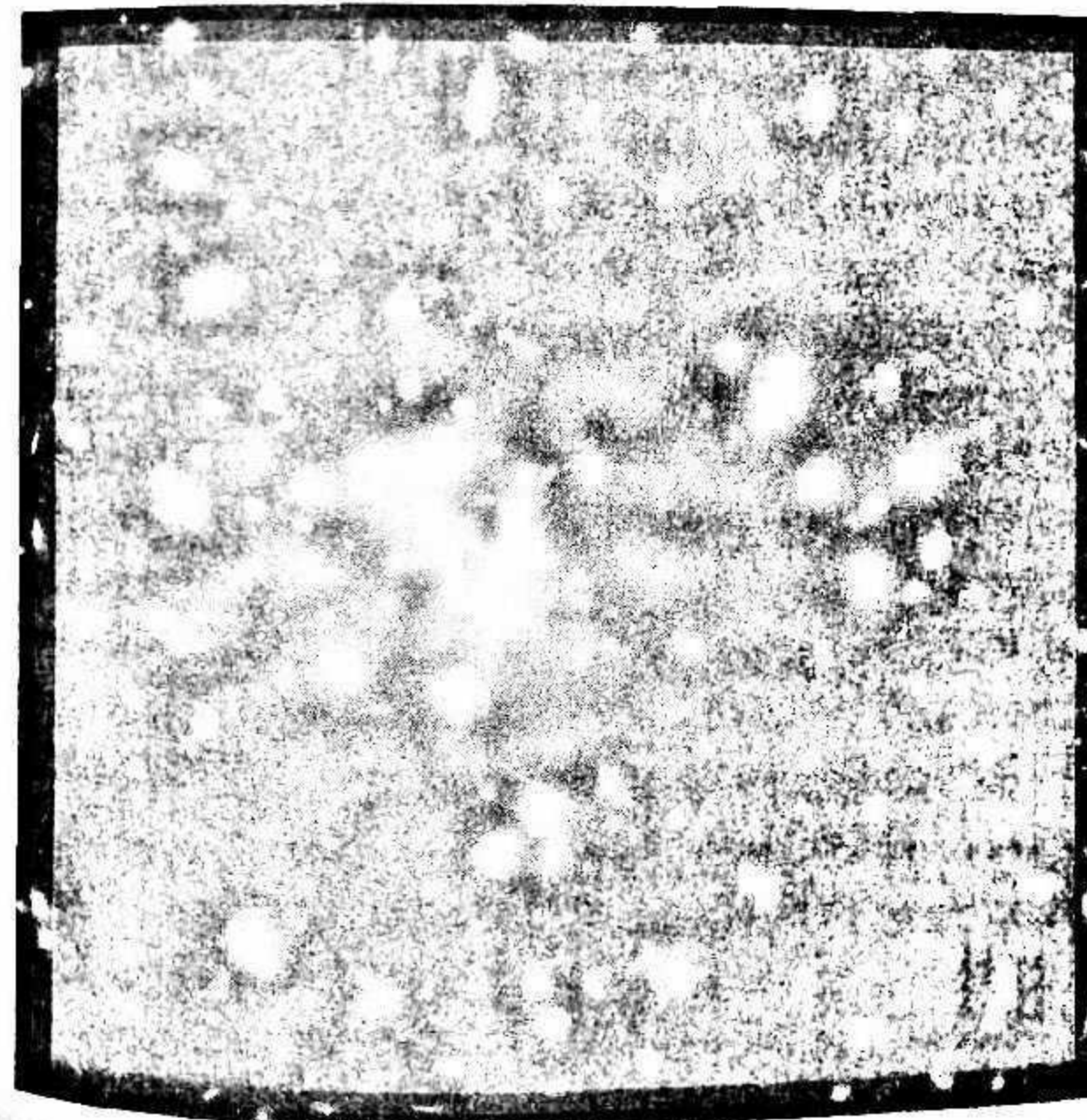


## Un ingrediente esencial

La materia oscura conforma aproximadamente el 23 % del contenido de materia y energía del universo, siendo alrededor del 4 % materia ordinaria y el resto energía oscura. Si tenemos en cuenta los dos tipos de materia, la oscura supone más del 85 %, lo que da cuenta de su importancia en el funcionamiento del universo. Conociendo tan poco sobre ella, apenas sus efectos gravitatorios, resulta evidente que estamos ante el próximo reto de la astrofísica, sin cuya resolución difícilmente podremos dar respuesta a muchas de las incógnitas que plantea la cosmología. La mayoría de astrónomos confirma su existencia, así que ahora debemos discernir su naturaleza.

### El principal candidato

Son diversas las hipótesis sobre la naturaleza de la materia oscura, pero ninguna ha sido aún demostrada. La que tiene más seguidores es la de que está compuesta por un nuevo tipo de partícula o partículas, llamadas partículas masivas de interacción débil (WIMPs, por sus siglas en inglés). Sus interacciones estarían protagonizadas solo por la gravedad y la fuerza débil, no emitiendo radiación electromagnética ni interactuando con ella, lo que dificulta su detección directa. Los físicos que trabajan en los aceleradores de partículas están tratando de descubrir alguna partícula que responda a estas propiedades. Si fuera identificada, el problema quedaría resuelto. De lo contrario, podrían tener que considerarse las opiniones de otro grupo de astrofísicos, que piensa que quizá los efectos observados podrían explicarse si se modificaran las leyes físicas actuales, como la relatividad.



Aunque la materia oscura no puede verse, su presencia en cada zona de este cúmulo de galaxias se ha podido inferir a partir de los efectos gravitatorios que ejerce a su alrededor. Disponiendo de esta información, se ha procesado la foto original, tomada por el telescopio espacial Hubble, agregándole la materia oscura, representada en forma de niebla. Gracias a ello, puede apreciarse que hay mucha materia oscura entre las galaxias y que la mayor concentración de esta se halla en la región central del cúmulo. Este, llamado Abell 1689, contiene, según algunas estimaciones, un millar de galaxias, y está a una distancia de aproximadamente 2 200 millones de años-luz.



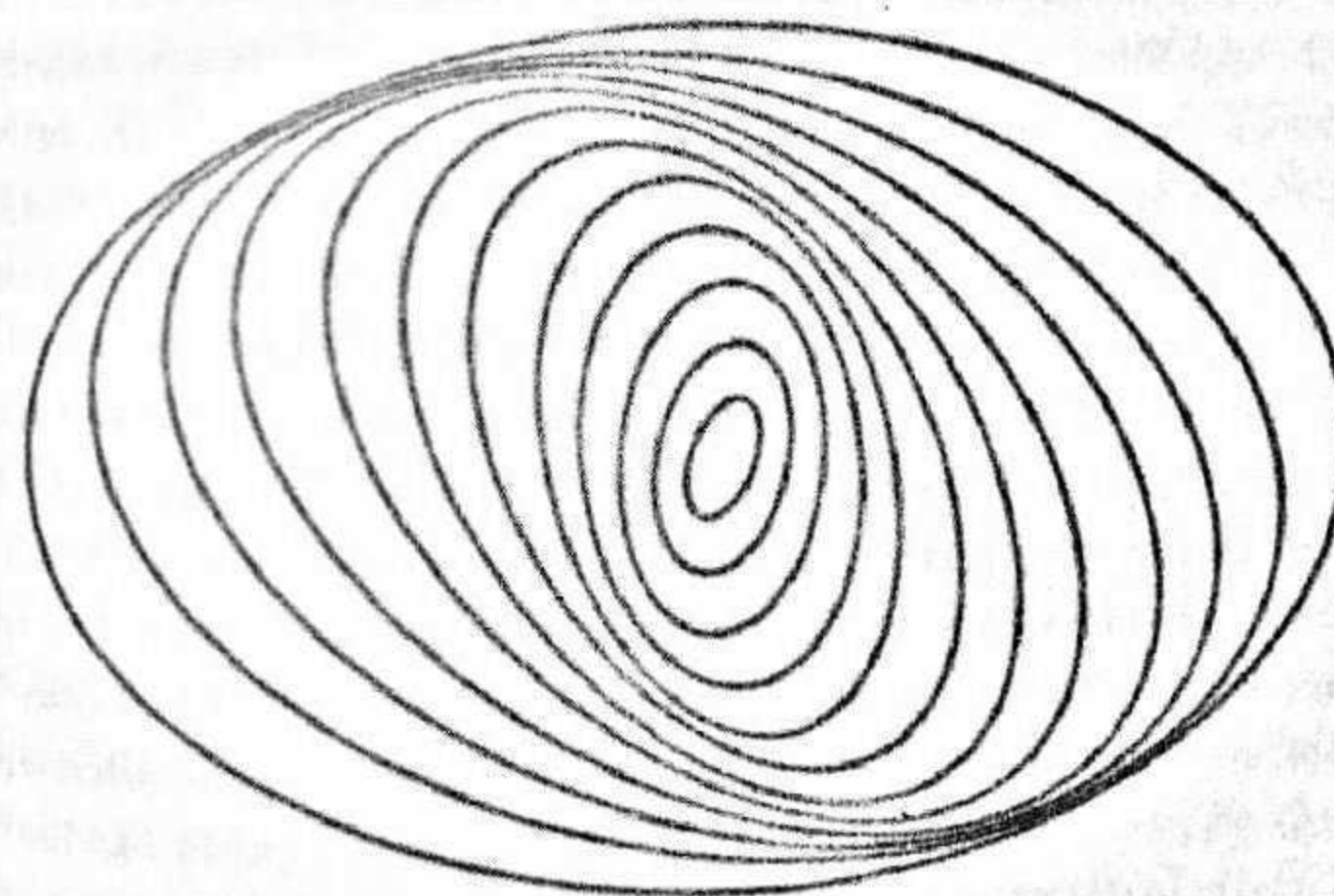
to del disco, sin embargo, las diferencias son considerables, ya que presentan gran cantidad de material interestelar y cúmulos abiertos, así como un alto ratio de formación estelar. Por este motivo, la población de estrellas de las galaxias espirales es relativamente joven respecto a la de las galaxias elípticas, donde tuvo lugar mayormente la formación estelar en sus etapas iniciales. Las estrellas predominantes en cada tipo de galaxia les confieren su luminosidad. Las estrellas más jóvenes y calientes de las galaxias espirales les proporcionan un tono azulado (radiación con mayor frecuencia) en contraste con el tono amarillo rojizo (radiación con menor frecuencia) de las galaxias elípticas. Otra diferencia es que los rangos de tamaño de las galaxias espirales observadas hasta el momento son más moderados que en las elípticas.

Las galaxias espirales presentan además del disco dos extensos halos aproximadamente esféricos a su alrededor: uno de estrellas, incluyendo gran cantidad de cúmulos globulares, y el otro de materia oscura. Aunque las estrellas, gas y polvo de las galaxias espirales se concentran y estructuran en el disco, parece que la mayor parte de la masa se encuentra en el halo de materia oscura. Esta presencia se deduce del movimiento estelar descrito en la *curva de rotación galáctica*, es decir, la curva que representa en una gráfica las velocidades de las estrellas en relación con su distancia al centro galáctico. La cuestión es que existe una discrepancia entre la curva predicha por la teoría y la observada, que se puede explicar considerando la existencia de una gran cantidad de masa no observable directamente, a la que se ha venido llamando materia oscura. La importancia relativa de la masa y la luminosidad de cada uno de los elementos que forman parte de una galaxia espiral es variable según el caso.

En cuanto a los núcleos, históricamente se han asociado a una estructura vieja con propiedades similares a las de las galaxias elípticas; sin embargo, hoy sabemos que existen varios tipos. Los bulbos clásicos, como por ejemplo en la galaxia de Andrómeda (M31) o en la M81, presentan una distribución espacial más o menos elipsoidal en contraposición a la distribución plana del disco. Acostumbran a estar formados por estrellas viejas, con

un bajo contenido de material interestelar. Las características y propiedades dinámicas de estas estrellas son similares a las de las galaxias elípticas. Se cree que los bulbos se generaron tras una fusión galáctica donde se destruyeron las estructuras originales, comprimiéndose el gas y formándose nuevas estrellas en la parte central. Por otro lado, existen también núcleos en forma de barra, como parece ser el caso de la Vía Láctea. Las barras modifican la estructura de la galaxia, modelando los brazos espirales y generando en ocasiones anillos o miniespirales en su zona próxima. Existen diversas hipótesis para explicar la existencia de las barras: podrían tener que ver con la reorganización de las órbitas estelares interiores debido a una onda de densidad originada en el centro de la propia galaxia o con las fuerzas de marea originadas por la interacción con otras. En cualquier caso, parece que en la barra se canaliza el material interestelar de los brazos hacia el centro. A partir de este flujo se generarían nuevas estrellas, explicando así por qué tantas galaxias con esta

FIG. 3



Representación gráfica derivada de la teoría según la cual los brazos espirales corresponden a una ligera variación en la orientación de las órbitas aproximadamente elípticas de las estrellas alrededor del centro galáctico.



estructura cuentan con un núcleo activo, como es el caso de la galaxia del Molinillo Austral (M83). Al ir acumulando masa, las barras irían transformándose con el tiempo, dando lugar primero a pseudobulbos y luego a bulbos. Se ha observado, por ejemplo, que las galaxias espirales con una gran cantidad de masa en su centro tienden a tener barras cortas y gruesas. Además, se han identificado estructuras barradas en el interior de muchos bulbos a través de la observación en el espectro infrarrojo. De todas formas, el gran número de galaxias con estructuras barradas hace pensar que el desarrollo de barras es un fenómeno recurrente. El tamaño y densidad tanto de bulbos como de barras puede ser muy variable, pero todo indica que ambos tipos de núcleo se caracterizan por albergar agujeros negros supermasivos en sus centros.

En cuanto al disco, tanto el gas y el polvo interestelar como la creación de estrellas se concentran en los brazos espirales que lo atraviesan. Así pues, en ellos se encuentran las estrellas más jóvenes y brillantes. Tienen aproximadamente la forma de espirales logarítmicas y rotan alrededor del centro de masas con una velocidad angular constante, que parece guardar relación con el grosor del disco. Su estructura puede explicarse teóricamente como el resultado de una perturbación de densidad. Es decir, considerando órbitas estelares aproximadamente elípticas que van variando ligeramente su orientación con su tamaño, como se muestra en la figura 3, se puede ver que se encuentran más próximas en determinadas zonas. Estas zonas corresponderían a la concentración de densidad en los brazos espirales. Las estrellas tienen pues unas velocidades distintas a las de los brazos y pueden atravesarlos regularmente. Cuando eso ocurre, la velocidad de la estrella se ve modificada por la mayor densidad del brazo, volviendo a recuperar su valor al salir. Para visualizar este efecto podemos imaginar, salvando las distancias, que las estrellas cambian de velocidad como los coches en una autopista con tráfico denso.

Tanto los tipos como los subtipos de las galaxias espirales se establecen con arreglo a las características del disco. La primera distinción es entre espirales y espirales barradas, siendo las

segundas más abundantes que las primeras. Aunque estudios recientes parecen indicar que el porcentaje de galaxias con barra central era mucho menor en el pasado que en la actualidad, ya que las barras son propias de galaxias espirales completamente formadas. En cuanto a los subtipos, se definen con arreglo a la distancia y definición de los brazos, así como al brillo del núcleo. El sistema más utilizado actualmente para clasificar estos tipos y subtipos es el de Hubble-de Vaucouleurs, que como ya hemos visto asigna el símbolo SA a las espirales clásicas con bulbo y el símbolo SB a las espirales barradas. Para los subtipos utiliza las letras a, b, c, d o una combinación de dos de ellas. En un extremo, la letra a denota que los brazos están estrechamente enrollados y bien definidos con un núcleo brillante. En el otro extremo, la letra d denota unos brazos separados y fragmentados con un núcleo muy tenue. También se creó un quinto subtipo con la letra m para describir galaxias que inicialmente fueron clasificadas como irregulares, pero en donde se acabaron encontrando estructuras espirales. En ocasiones, para referirse a las galaxias formadas por brazos continuos bien definidos se usa también el término *galaxias de gran diseño*. En contraposición, para las formadas por brazos espirales discontinuos compuestos por multitud de segmentos, se usa *galaxias flocculentas*. Se estima que alrededor de una de cada tres galaxias espirales es una galaxia de gran diseño. Respecto a la nuestra, la Vía Láctea es una espiral barrada actualmente clasificada como SB(rs)bc.

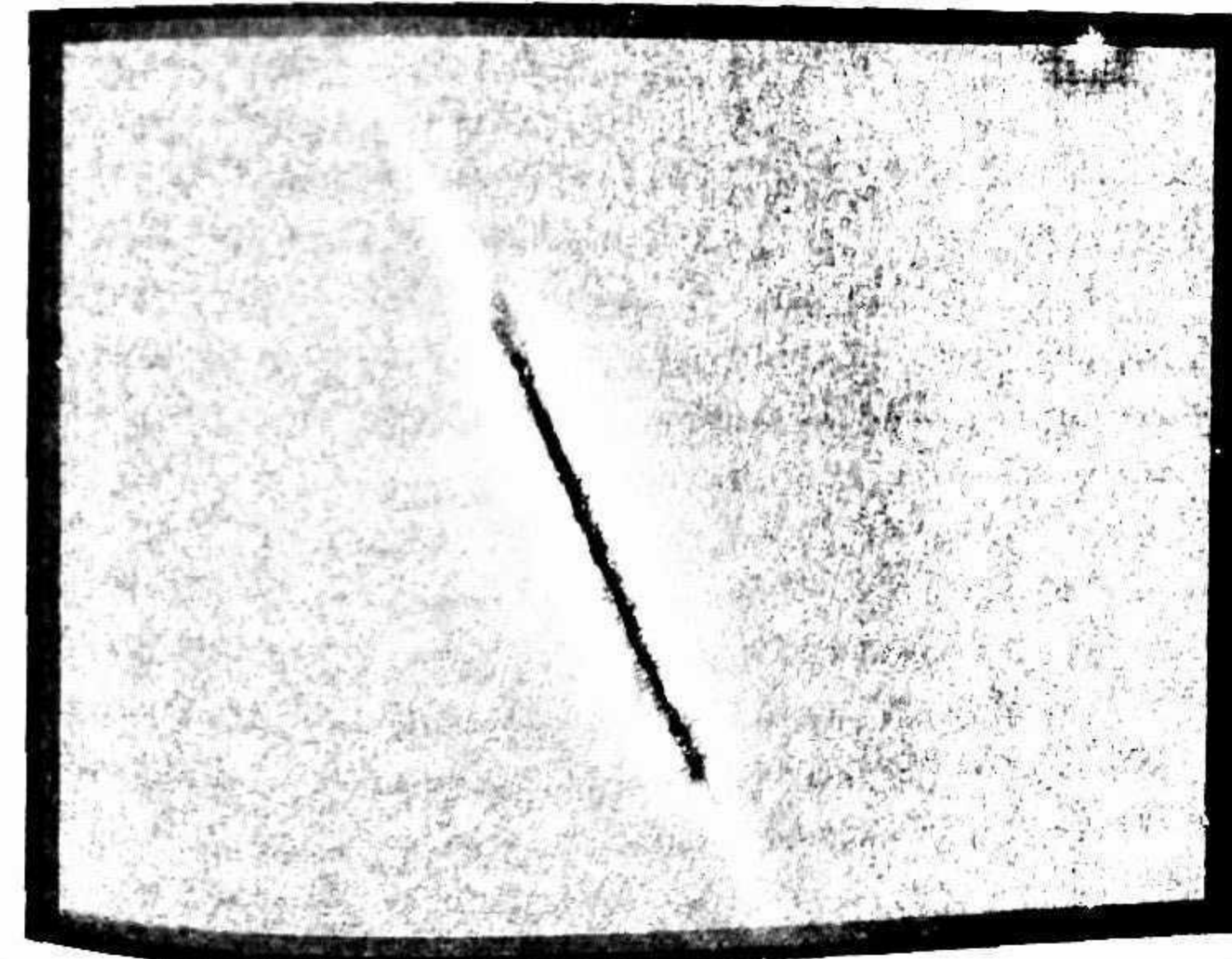
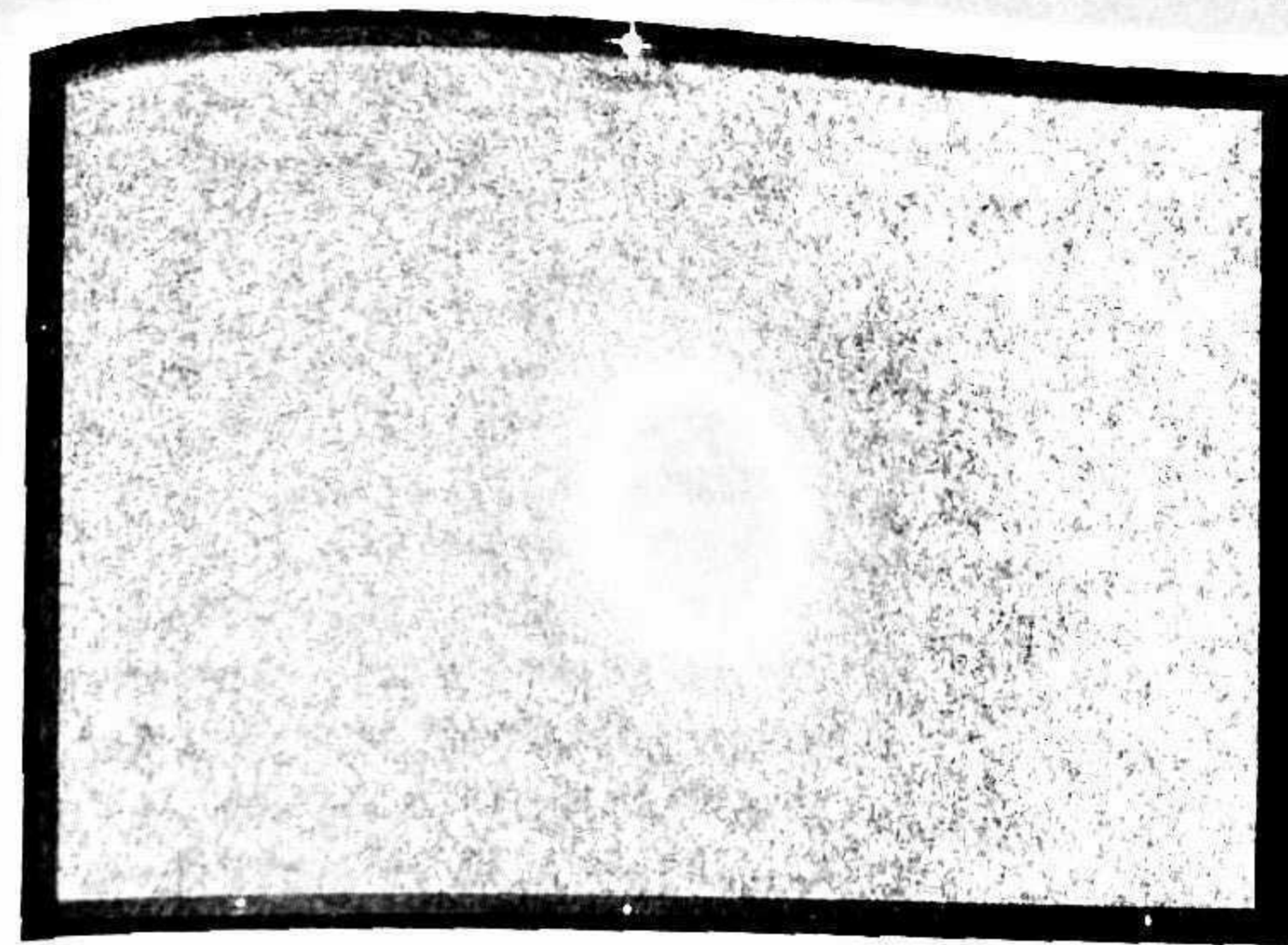
Finalmente, hay que señalar que recientemente se han encontrado unas pocas decenas de galaxias espirales superluminosas que pueden competir en tamaño y en brillo con las mayores galaxias elípticas. Sus masas y luminosidades son unas diez veces mayores que las de la Vía Láctea, con ratios de formación estelar unas treinta veces superiores. Estas galaxias habían pasado desapercibidas durante largo tiempo, ya que tienen la misma apariencia que las otras galaxias espirales. El descubrimiento de su verdadera magnitud cogió por sorpresa a un equipo de investigadores que analizaba la base de datos *NASA Extragalactic Database*, una recopilación en la red de millones de objetos astronómicos. La existencia de estas espirales plantea nuevas



preguntas sobre la formación y evolución galáctica, no solo por su tamaño sino también por sus características, ya que algunas de ellas incluso contienen dos núcleos.

### Otros tipos de galaxias

Además de las galaxias elípticas, espirales y espirales barradas, existen otras cuyas morfologías no encajan en ninguno de los tipos anteriores. Existen por ejemplo las *galaxias lenticulares*, con características intermedias entre las galaxias elípticas y las espirales, clasificadas como S0A o S0B en la secuencia de Hubble-de Vaucouleurs. Las galaxias de este tipo cuentan con un disco como las espirales, pero tienen escaso material interestelar como las elípticas, aunque a veces pueden contener una cierta cantidad, sobre todo de polvo. Carecen de brazos espirales, aunque pueden presentar una estructura espiral muy indefinida. En ocasiones albergan un núcleo en forma de estructura barrada central, en cuyo caso se clasifican como S0B y en el contrario como S0A. En general son poco abundantes, sumando solamente un pequeño porcentaje del total de las galaxias observadas. Sin embargo, pueden abundar en ciertos cúmulos galácticos ricos en gas intergaláctico caliente. Se cree que originalmente fueron galaxias espirales y perdieron su gas por rozamiento con el gas intergaláctico o por interacción gravitatoria con otras galaxias. Existen también otras hipótesis alternativas, según las cuales serían el resultado de la fusión entre dos galaxias espirales desiguales, durante la que se habría consumido el gas interestelar. Un caso intermedio entre galaxias espirales y lenticulares son las *galaxias endémicas*, con estructuras espirales pero escaso contenido en material interestelar y un bajo ratio de formación de estrellas. Las que no se encuentran en cúmulos ricos, puede que simplemente hayan agotado su material interestelar con el tiempo. Aunque cada vez existen más evidencias de que las galaxias lenticulares han evolucionado a partir de galaxias espirales, su origen sigue siendo tema de discusión. Entre las más destacadas podemos encontrar, por ejemplo, a la M85 o la NGC 5866 (véanse las imágenes de la página siguiente).



Arriba, la galaxia M85. Ha sido clasificada muchas veces como una galaxia lenticular que nos estaría presentando su cara, aunque según estudios recientes podría ser considerada elíptica. Abajo, la galaxia NGC 5866, también conocida como galaxia del Ojo, que ha sido clasificada muchas veces como lenticular aunque podría ser que contara con una estructura espiral que no podemos ver debido a su orientación. Algunos astrónomos creen que la galaxia NGC 5866 puede ser el objeto M102, que se ha asociado en ocasiones a una entrada doble errónea para el M101.



Más allá de los tres tipos básicos de la clasificación Hubble de Vaucouleurs y de sus transiciones, podemos encontrar otras tipologías morfológicas irregulares. La clasificación original de Hubble las separaba en dos subtipos: Irr-I con una cierta estructura y Irr-II sin ella. Posteriormente, con la extensión de De Vaucouleurs algunas galaxias con trazas de estructura espiral del tipo Irr-I pasaron a formar parte de los subtipos SAm o SBm y el resto junto a las del tipo Irr-II pasaron a formar parte de los distintos subtipos de I. Entre las galaxias más irregulares encontramos algunas con apariencia totalmente caótica, sin ninguna señal de núcleo o estructura espiral. Se cree que pudieron ser espirales o elípticas antes de sufrir grandes deformaciones al entrar en el campo de influencia gravitatoria de grandes masas en su exterior. Es decir, sus características provienen de su interacción gravitatoria con otros grandes objetos cercanos, básicamente otras galaxias. La mayoría contienen una gran cantidad de gas y polvo, pero no todas. Por otro lado, algunas galaxias irregulares enanas tienen características que podrían ser parecidas a las que tuvieron las galaxias que originalmente poblaron el universo. Por ejemplo, poseen grandes cantidades de gas con un porcentaje relativamente bajo de elementos más pesados que el hidrógeno. Sin duda, su estudio detallado va a aportar nuevas claves a la comprensión de la evolución galáctica en la historia del universo.

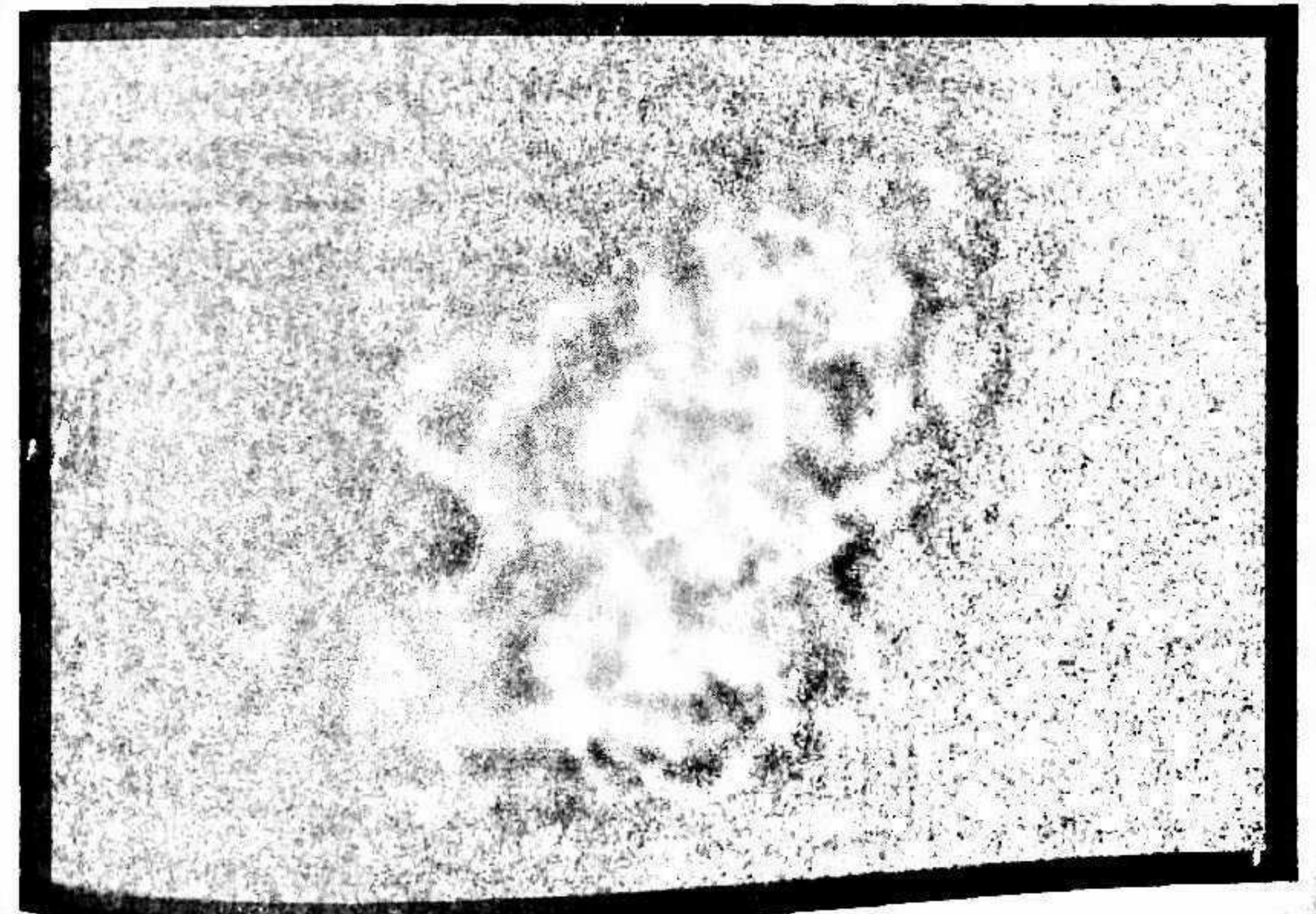
Las galaxias enanas constituyen un caso especial, ya que sus tipos no están tan claros como en las de mayor tamaño. Las enanas elípticas tienen propiedades intermedias entre las enanas irregulares y los cúmulos globulares. Algunas enanas elípticas son llamadas en ocasiones *enanas esferoidales* por tener propiedades distintas al resto, más similares a las de las espirales e irregulares. Se cree que las galaxias enanas son las más abundantes del universo, aunque no se han podido observar directamente debido a su escasa luminosidad. Pueden tener desde unos pocos millones hasta miles de millones de estrellas y longitudes de decenas hasta decenas de miles de años-luz, entre uno y cuatro órdenes de magnitud por debajo de la Vía Láctea. Sus densidades pueden ser variables, habiéndose identificado recientemente

## LA VIOLENCIA DE LAS SUPERNOVAS

Las supernovas son explosiones estelares que pueden aparecer destacando en la esfera celeste, incluso a simple vista. Justamente a eso deben su nombre original en latín, *novae*, que significa nuevas. Pueden durar desde semanas a meses y consisten en un rápido aumento de la luminosidad y un decrecimiento más o menos suave hasta desaparecer. Su luminosidad puede llegar a alcanzar una magnitud que supere a la de la galaxia donde se encuentran, habiéndose incluso identificado galaxias con posterioridad a la aparición de supernovas. Su origen puede deberse a causas diversas, como por ejemplo el colapso gravitatorio de una estrella masiva. El remanente de una supernova es una estructura nebulosa rodeada por una onda de choque expansiva que barre su entorno, y un núcleo que puede consistir en una estrella de neutrones o un agujero negro.

## La nebulosa del Cangrejo

Con este nombre tenemos al remanente de una supernova que ocupa el primer lugar en el catálogo Messier (M1). Fue observada por primera vez en el siglo XI por astrónomos chinos y árabes. En su centro se puede encontrar una estrella de neutrones que rota sobre sí misma 30 veces por segundo, emitiendo pulsos de radiación electromagnética en todas las frecuencias, lo que se conoce como púlsar. Su descubrimiento constituyó una de las primeras pruebas de que las explosiones de supernovas pueden generar a estos últimos.



Imagen, captada en infrarrojos por el telescopio espacial Spitzer, de la nebulosa del Cangrejo.



te galaxias enanas ultracompactas con densidades por encima de un centenar de estrellas por año-luz cúbico. Este es el caso de M60-UCD1, cerca de M60 en el cúmulo de Virgo, que concentra alrededor de la mitad de la masa estelar en un diámetro de unos 160 años-luz, convirtiéndola en una de las galaxias más densas conocidas. En general, las galaxias enanas acostumbran a orbitar alrededor de galaxias mayores. Así, se conocen más de diez orbitando alrededor de la Vía Láctea y se cree que este número podría ser mucho mayor.

Finalmente, existen otros tipos morfológicos bien definidos con características muy específicas. Por ejemplo, las *galaxias anulares* presentan un anillo de estrellas y medio interestelar alrededor de un núcleo vacío. Se cree que se originan cuando una galaxia espiral es atravesada por una galaxia de menor tamaño. Algo parecido puede haberle sucedido a la galaxia de Andrómeda, ya que presenta una estructura con múltiples anillos cuando es observada en el espectro infrarrojo. Otra tipología que podemos encontrar son las *galaxias ultradifusas*, cuya densidad es extremadamente baja. Pueden tener un tamaño similar a la Vía Láctea, pero tan solo con un uno por ciento de sus estrellas. Se caracterizan asimismo por la escasez de gas interestelar a partir del cual se puedan formar nuevas estrellas, por lo que su población estelar está envejecida. La baja densidad de material visible tiene como consecuencia su baja luminosidad. Como último apunte, hay que recordar que tan solo una pequeña parte de las galaxias ha sido observada directamente, así que es más que probable que el número de tipos morfológicos específicos aumente con el perfeccionamiento de las técnicas de observación.

## OTRAS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS

Además de todas las características consideradas en las clasificaciones morfológicas, existen otras a partir de las cuales se pueden distinguir las galaxias. Algunas de las más destacadas son el ratio de formación estelar o la actividad de los núcleos, con las que se pueden definir otras tipologías, como las galaxias con brote este-

lar o las galaxias con núcleo activo. Por un lado, las galaxias con brote estelar se caracterizan por tener un ratio de formación estelar excepcionalmente alto. Se trata de episodios puntuales, ya que la formación de estrellas se produce a una velocidad tal que consumiría el gas interestelar en un periodo relativamente corto en comparación con la vida de la galaxia, del orden de decenas de millones de años. Se calcula que en la actualidad estos brotes suponen una pequeña parte del total de la producción estelar del universo, pero probablemente fueron mucho más frecuentes en los estadios iniciales de este. Por otro lado, las galaxias con núcleo activo se caracterizan por tener unas emisiones nucleares que representan una cantidad significativa del total de la radiación de la galaxia. Existen varios tipos de galaxias con núcleo activo, entre las que podemos encontrar quásares, galaxias Seifert, blazares, *liners*, o galaxias luminosas infrarrojas, las dos últimas presentando también características de brote estelar.

Como las galaxias con brote estelar tienen un ratio de formación estelar muy superior al de las galaxias normales, las estrellas recién formadas son relativamente frecuentes. Los brotes estelares tienen lugar en enormes nubes de gas, ocasionalmente acompañado de abundante polvo, y pueden detectarse a través de la observación en el espectro infrarrojo o de rayos X. Algunas estrellas recién formadas son muy masivas e ionizan su entorno creando *regiones H II*, nombre usado en astronomía para referirse al hidrógeno ionizado (sus protones y electrones se encuentran libres) en contraposición al hidrógeno neutro H I. Estas regiones pueden ser observadas a gran distancia y resultan de mucha utilidad para la determinación del alejamiento y la composición química de las galaxias. Además, las estrellas masivas pueden generar explosiones de supernovas cuyos remanentes se expanden, pudiendo provocar una reacción en cadena de formación de nuevas estrellas en la región gaseosa circundante. Estos episodios pueden dar lugar al nacimiento de una gran cantidad de estrellas en un periodo de tiempo relativamente corto, de varios millones de años. El brote termina cuando los intensos vientos estelares y las explosiones de supernovas dispersan los gases de la región.



Los brotes estelares se acostumbran a asociar con galaxias que interactúan gravitatoriamente entre ellas. Las galaxias irregulares, por ejemplo, acostumbran a presentar regiones con brote estelar. Un claro ejemplo es la galaxia del Cigarro (M82) en la constelación de la Osa Mayor. Se trata de una galaxia alargada y estrecha con un elevado ratio de formación estelar en su centro. Esto es consecuencia al parecer del acercamiento a la galaxia de Bode (M81), hace varios centenares de millones de años. El intenso brote estelar que provocó este episodio duró unos cincuenta millones de años, seguido por otros, el último de los cuales hace tan solo unos pocos millones de años, cuando se formaron los cúmulos del núcleo. La interacción gravitatoria entre galaxias cercanas puede causarles serias distorsiones e incluso pueden llegar a intercambiar gas y polvo. Si las galaxias llegan a cruzarse pueden atravesarse si su momento relativo lo permite, en lo que se conoce como colisión galáctica. A pesar de su nombre, las estrellas no acostumbran a colisionar: tan solo el polvo de las distintas galaxias interactúa provocando brotes y generando estructuras diversas, como por ejemplo barras o anillos. En caso de que el momento relativo de las galaxias que se cruzan impida que se atraviesen, se produce una fusión. Es decir, se van juntando gradualmente en una única galaxia mayor que puede ser muy distinta de las originales. Si una de las galaxias originales es mucho más masiva que la otra, la fusión se conoce como canibalismo. La galaxia mayor apenas se ve alterada, mientras que la menor pierde completamente sus características.

Las galaxias con núcleo activo, también conocidas como galaxias activas, están caracterizadas por tener un núcleo que emite una cantidad significativa del total de la radiación emitida por la galaxia. La explicación más extendida para este fenómeno considera la formación de un *disco de acreción* alrededor de un agujero negro supermasivo central. La radiación emitida desde el núcleo es energía liberada cuando la masa del disco va siendo absorbida por el agujero negro. Existen varios tipos de galaxias con núcleo activo, entre las que podemos destacar los quásares y las galaxias Seyfert. Ambos pueden emitir grandes cantidades de radiación electromagnética en distintas frecuencias, incluyendo la altamen-

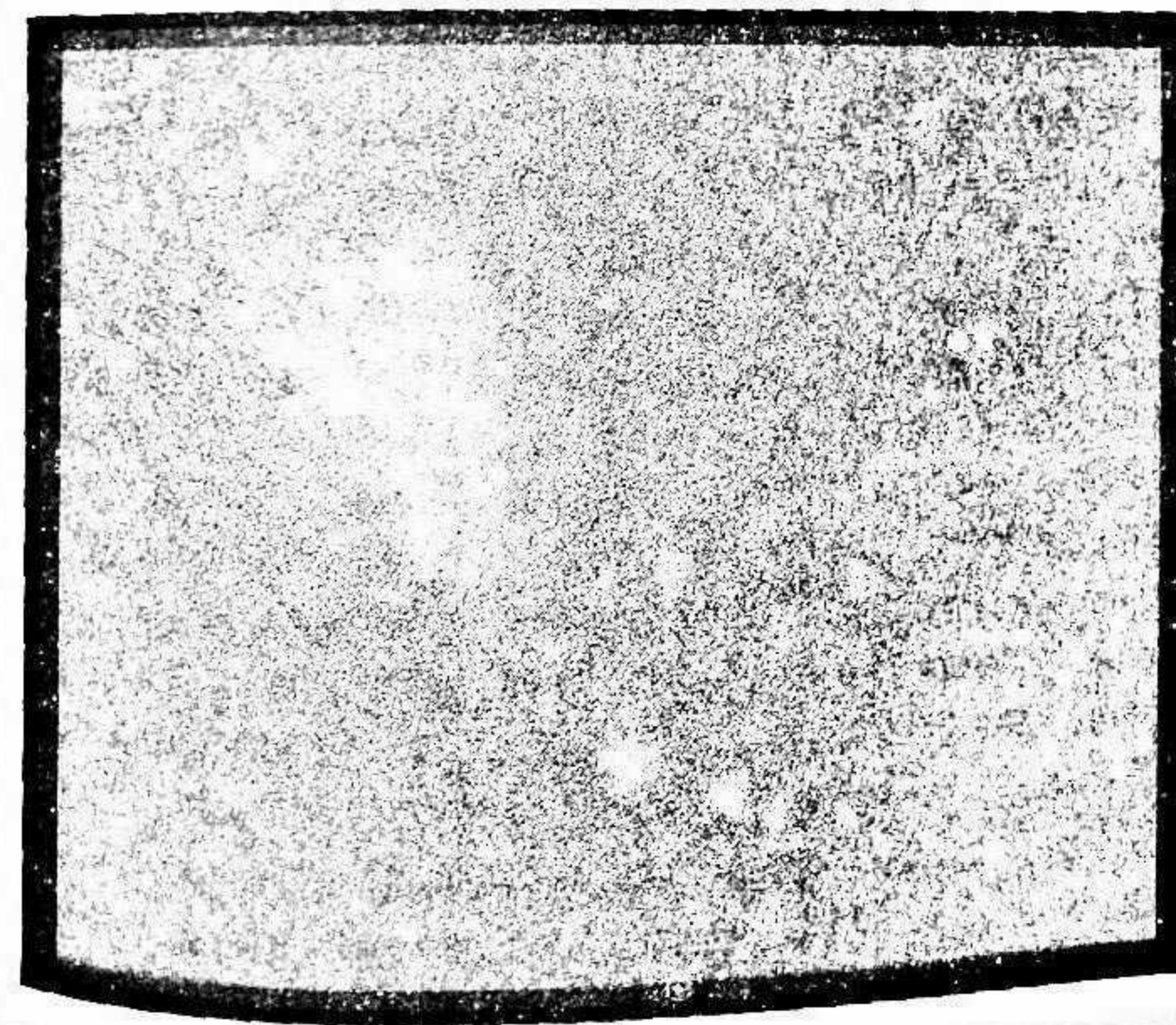
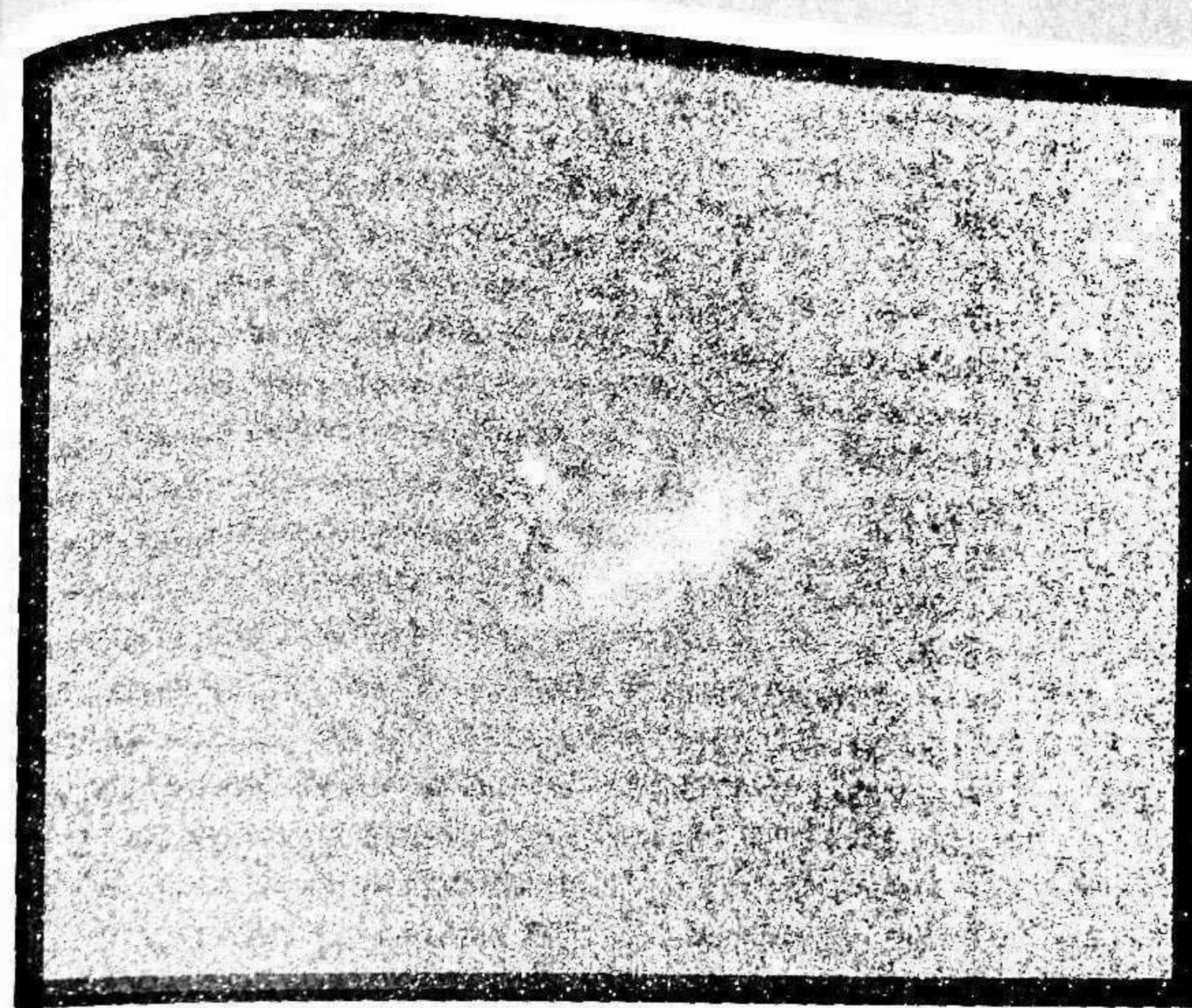


Arriba, imagen en detalle de la galaxia de Andrómeda. Abajo, imagen tomada por Yuri Beletsky con un aparato fotográfico desde las instalaciones del VLT, perteneciente al Observatorio Europeo Austral. En la parte izquierda de la foto son visibles las Nubes de Magallanes.



te energética, como los rayos X. Por un lado, los quásares son los núcleos activos más distantes y con emisiones más energéticas. Fueron las primeras fuentes de radiación electromagnética identificadas con un alto desplazamiento al rojo. Su nombre proviene de su apariencia más similar a las fuentes puntuales de las estrellas que a las fuentes más extensas de las galaxias. Este efecto es debido a su lejanía, sabiéndose hoy en día que pueden llegar a ser más de cien veces más luminosas que la Vía Láctea. Por otro lado, las galaxias Seyfert cuentan con núcleos similares a los de los quásares en tanto en cuanto son muy distantes y con emisiones más energéticas. La diferencia con los quásares es que están rodeados por galaxias que se pueden detectar. Observadas en el espectro visible, la mayoría de ellas parecen espirales normales. La diferencia viene cuando se observan en otras frecuencias, resultando la luminosidad del núcleo comparable a la luminosidad de una galaxia entera como la Vía Láctea. En algunas galaxias con núcleo activo, se han detectado pares de chorros de partículas a velocidades cercanas a la de la luz en direcciones diametralmente opuestas, cuya naturaleza es todavía tema de discusión. Se cree que el caso particular donde uno de sus chorros está dirigido hacia la Tierra constituye los objetos identificados como blazares.

Existen también fuentes que se han relacionado tanto con brotes estelares como con núcleos activos. Por ejemplo, los liners (siglas en inglés de *low-ionization nuclear emission-line regions*) son regiones nucleares en cuyas emisiones se puede detectar la presencia de una cantidad importante de elementos con ionización débil. La existencia del gas ionizado origen de estas fuentes es motivo de debate, entre los que creen que está relacionada con regiones de formación estelar y los que piensan que lo está con agujeros negros supermasivos centrales. En cualquier caso, son relativamente frecuentes entre las galaxias próximas, apareciendo en una de cada tres de ellas. La mayoría de estas galaxias tienen un bajo ratio de formación estelar, por lo que en estos casos parece ser que el origen de los liners no son los brotes estelares. Sin embargo, recientes observaciones han establecido una clara conexión entre la formación de estrellas y los liners detectados en *galaxias luminosas infrarrojas*.



Arriba, imagen en detalle de la Gran Nube de Magallanes. Abajo, imagen en detalle de la Pequeña Nube de Magallanes.



Las galaxias luminosas infrarrojas (LIRG, según sus siglas en inglés) deben su nombre a que emiten más radiación infrarroja que en el total del resto del espectro electromagnético. Pueden tener un brote estelar, un núcleo galáctico activo, o ambas cosas. En cualquier caso, la mayor parte de la radiación emitida por estas causas es absorbida por grandes cantidades de polvo, que al calentarse emite radiación infrarroja. La mayoría de las galaxias luminosas infrarrojas parecen haber tenido algún tipo de interacción reciente con otras galaxias, cuando no son directamente resultado de una fusión. Gracias al telescopio Spitzer, se han podido comparar los espectros electromagnéticos de las galaxias infrarrojas luminosas conteniendo liners con los de galaxias con brote estelar, resultando muy similares. Sin embargo, también se han detectado similitudes con galaxias activas, así que la formación de estrellas podría no ser la única fuente de estos liners. Las luminosidades de las galaxias infrarrojas luminosas alcanzan decenas de veces la de la Vía Láctea, pudiendo alcanzar las ultraluminosas (ULIRG, según sus siglas en inglés) valores cientos de veces la de la Vía Láctea. Un ejemplo interesante es la galaxia cercana NGC 6240, al parecer resultado de la fusión de dos galaxias, ya que cuenta con dos núcleos. En el extremo de las galaxias infrarrojas luminosas encontramos las extremadamente luminosas (ELIRG, según sus siglas en inglés), como la WISE J224607.57-052635.0, considerada la galaxia más luminosa del universo conocida hasta el momento.

## GALAXIAS DESTACADAS

Existen algunas galaxias que por motivos históricos o simplemente por su espectacularidad ocupan un lugar destacado entre la sociedad. Sin considerar la Vía Láctea, la primera galaxia de cuya observación se tiene constancia es la de Andrómeda en el siglo X. Aunque parece que ya era conocida por las civilizaciones antiguas, debemos su primer registro a Abd Al-Rahman Al Sufi, a quien asimismo debemos el primer registro de las Nubes de Magallanes a unos  $-70^\circ$  de declinación en el hemisferio sur celeste. Si bien él mismo reconoce que no podían ser vistas desde Bagdad,

también comenta que sí podían ser observadas desde el estrecho de Bab el-Mandeb en el Yemen, a unos  $12^\circ$  de latitud norte. En Europa, su observación no fue registrada hasta principios del siglo XVI, durante el viaje de circunnavegación que inició Fernando de Magallanes, a quien deben su nombre actual. Sin embargo, con total seguridad las culturas prehistóricas del hemisferio sur habían reparado ya en ellas, e incluso parece que fueron objeto de numerosas leyendas y utilizadas para la navegación. En cuanto al resto de galaxias destacadas, hay que esperar al siglo XVIII para sus primeras observaciones registradas. Charles Messier fue uno de los primeros en compilar un catálogo de objetos astronómicos brillantes con aspecto nebuloso, entre los que había una treintena de galaxias. La de Andrómeda lleva el identificador M31, pero las Nubes de Magallanes no aparecen por estar en el hemisferio sur. Poco después, William Herschel publicó sus mucho más extensos catálogos, que constituirían la base del *New General Catalogue*. Hoy en día contamos con observatorios mucho más evolucionados, gracias a los cuales hemos obtenido mucha información de todas estas galaxias, que incluye imágenes de gran calidad.

La galaxia de Andrómeda (M31) es la galaxia espiral más cercana a la Vía Láctea (véase la imagen superior de la página 109). Es una de las tres galaxias espirales que dominan el Grupo Local junto a la Vía Láctea y la galaxia del Triángulo (M33), siendo la más grande y brillante entre ellas. Situada a 2,5 millones de años-luz de nosotros, es el objeto más alejado que se puede ver a simple vista, sin considerar la galaxia del Triángulo que algunos dicen poder ver. Se encuentra en el hemisferio norte celeste, aproximadamente a unos  $+41^\circ$  de declinación en la constelación de Andrómeda. Su longitud se estima aproximadamente en unos 220 000 años-luz y su número de estrellas en un billón, al menos doblando el número de estrellas de nuestra galaxia. La galaxia de Andrómeda se está acercando hacia nosotros y se cree que dentro de unos miles de millones de años podría encontrarse con la Vía Láctea. La fusión de ambas galaxias podría dar lugar, como se ha dicho, a una elíptica supergigante.

Las Nubes de Magallanes son dos galaxias enanas del Grupo Local cercanas a la Vía Láctea (véanse las imágenes de la pág.



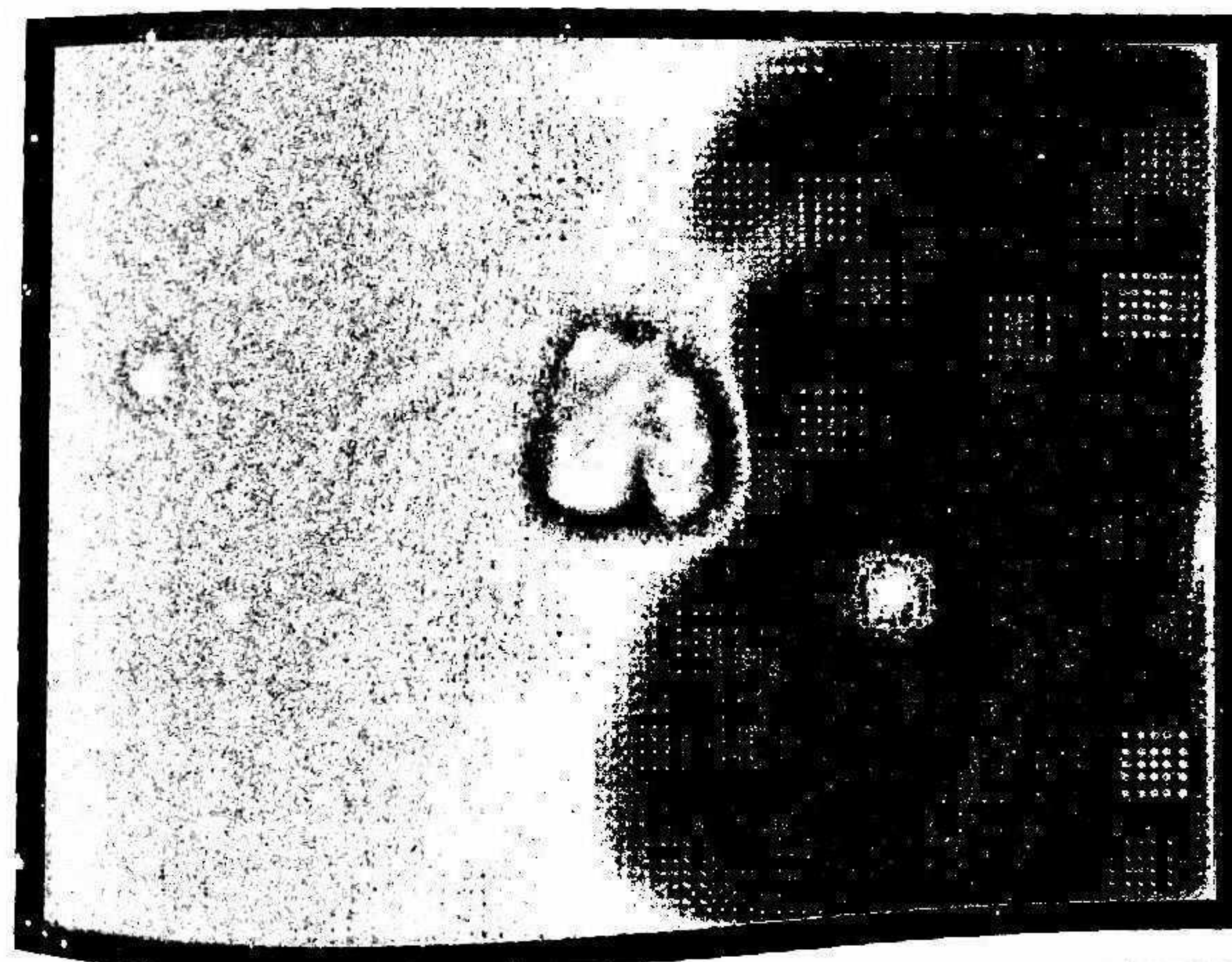
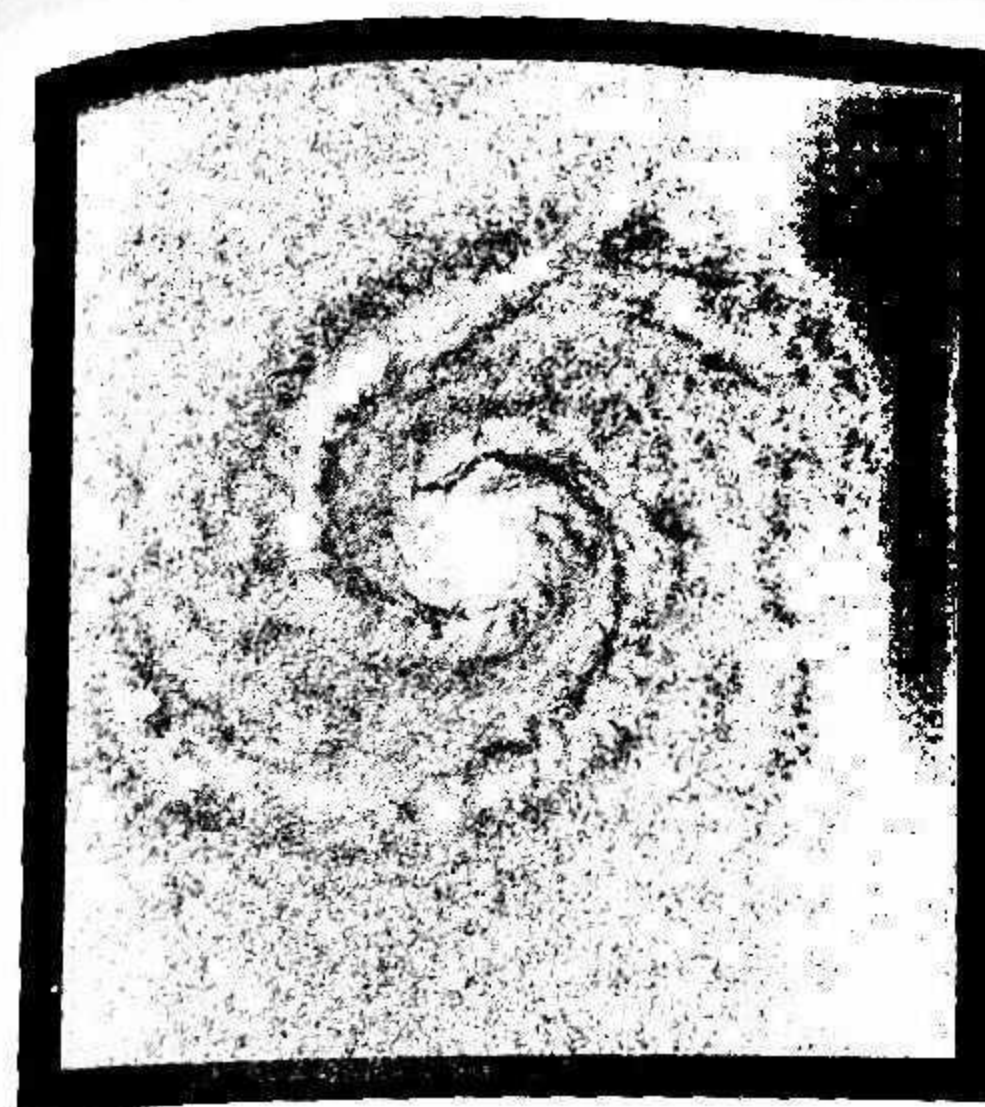
111). La mayor es conocida como Gran Nube de Magallanes y la menor como Pequeña Nube de Magallanes, encontrándose respectivamente a unos 160 000 y 200 000 años-luz de nosotros y habiendo unos 75 000 años-luz entre ellas. Se encuentran en el

Nuestra galaxia es bastante ordinaria. Así que si creemos que posee un agujero negro supermasivo, eso nos dice que la mayoría, sino todas las galaxias, albergan tal agujero negro en sus centros.

ANDREA M. GHEZ

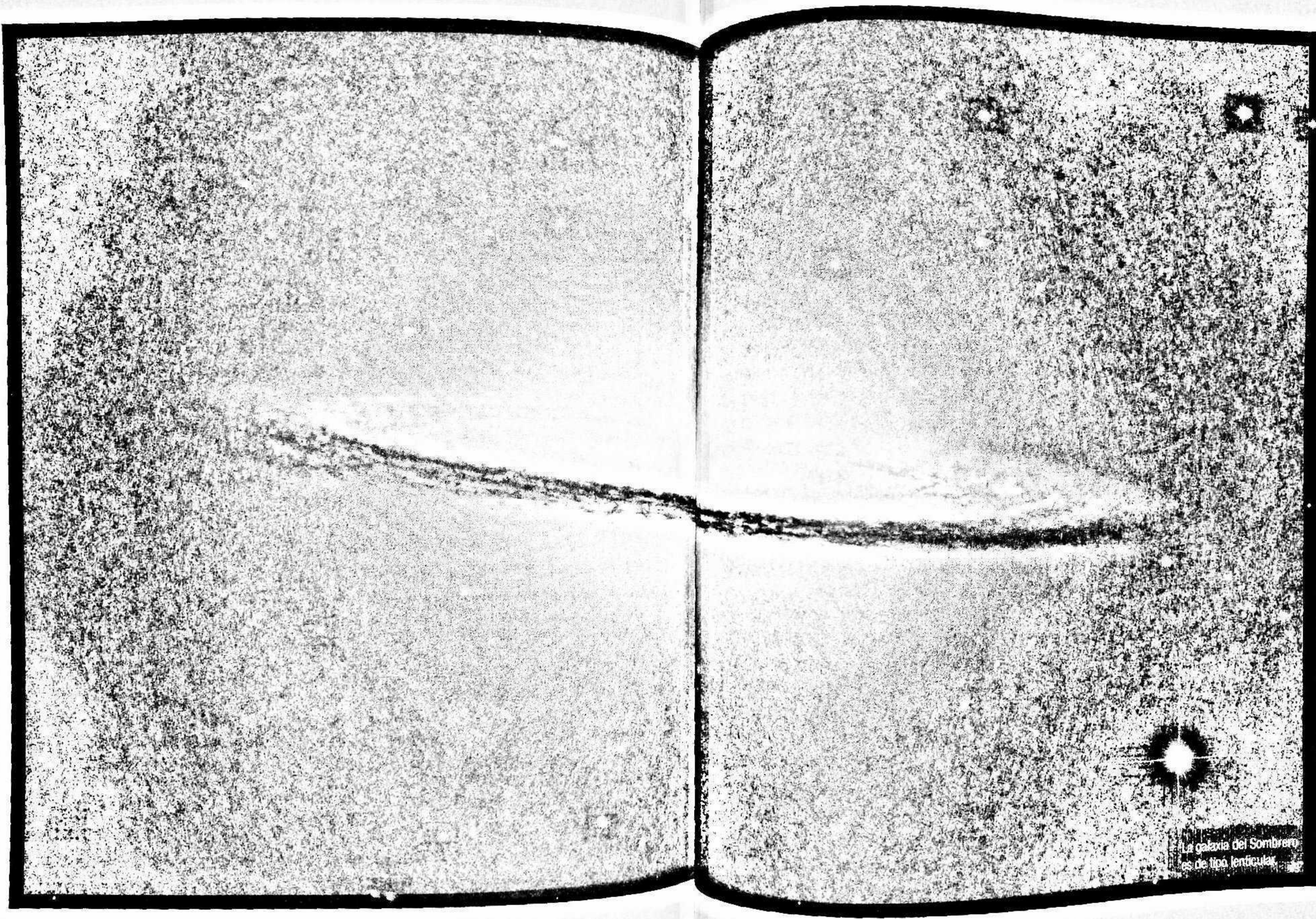
hemisferio sur celeste, formando un triángulo con el polo sur celeste con lados de aproximadamente unos  $20^\circ$  de distancia angular. En noches con cielo despejado, se pueden ver claramente como dos pequeñas manchas blanquecinas. Sin embargo, ninguna de las dos tiene identificador Messier por no ser visibles desde las latitudes medias del hemisferio norte. En cuanto al *New General Catalogue*, tan solo la menor cuenta con el identificador NGC 292. La mayor no lo tiene porque se asignaron distintos identificadores NGC a varios cúmulos estelares y otros objetos que la componen. Aunque tradicionalmente se ha pensado que orbitaban en torno a nuestra galaxia, desde hace unas décadas se cree que más bien están de paso debido a su elevada velocidad radial. En cualquier caso, la interacción gravitatoria con la Vía Láctea parece haberlas deformado seriamente. Al mismo tiempo, su presencia parece haber afectado también a nuestra galaxia, deformando partes externas de su disco. Además, se han detectado corrientes de hidrógeno neutro que conectan a las tres. La mayor tiene una longitud de unos 14 000 años-luz y la pequeña de la mitad, siendo sus masas unas cien veces menores que la de la Vía Láctea. Otras diferencias respecto a nuestra galaxia son su mayor riqueza en gas y su población estelar más joven.

Existen asimismo una serie de galaxias no visibles sin instrumentos de observación pero que pueden ser reconocidas fácilmente con telescopios de aficionado. Algunas de las más populares por su espectacularidad son la galaxia del Remolino, la galaxia del Ojo Negro (véanse las imágenes superiores de la página contigua), la galaxia del Sombrero (véase la imagen de las págs. 116-117) o las galaxias de las Antenas (véase la imagen inferior de la página contigua).



En el extremo superior, imágenes de las galaxias espirales del Remolino (izquierda) y del Ojo Negro (derecha).  
Abajo, las galaxias irregulares de las Antenas.





La galaxia del Sombrero  
es de tipo lenticular.



La galaxia del Remolino (M51) es una galaxia espiral que se encuentra a aproximadamente  $+47^\circ$  de declinación en la constelación Canes Venatici. Su distancia no se conoce con precisión, oscilando las estimaciones entre 15 y 35 millones de años-luz según el método utilizado. Es una de las más brillantes del cielo, pudiendo observarse con unos simples prismáticos. Al presentársenos de cara podemos ver claramente su estructura espiral, de ahí su nombre. De hecho, fue la primera galaxia en la que se observó una estructura espiral, aunque esto ocurrió en el siglo XIX, antes de que se estableciera su naturaleza galáctica. Es la galaxia dominante de su grupo y está acompañada por la galaxia enana NGC 5195, con la que interactúa gravitatoriamente.

La galaxia del Ojo Negro (M64) es una galaxia espiral que se encuentra aproximadamente a  $+22^\circ$  de declinación en la constelación de Coma Berenice, a una distancia estimada de entre 15 y 30 millones de años-luz. Su nombre se debe a que presenta un anillo de polvo alrededor de su núcleo que oscurece su brillo. Desde un punto de vista científico, es interesante señalar que el gas interestelar de la región interior gira de forma opuesta al gas de la región exterior, existiendo una importante formación estelar en el límite entre ambas. Se especula que este comportamiento podría ser fruto de la absorción de una galaxia menor rotando en sentido retrógrado, entre otras hipótesis.

La galaxia del Sombrero (M104), por su parte, es una galaxia lenticular que se encuentra a aproximadamente  $-12^\circ$  de declinación en la constelación de Virgo, a una distancia estimada de alrededor de 30 millones de años-luz. Cuenta con un núcleo especialmente grande y brillante, así como con un prominente anillo de polvo rodeando el disco galáctico. Su nombre se debe a que se nos presenta casi de canto, con la apariencia de sombrero.

Las galaxias de las Antenas (NGC 4038 y NGC 4039) son dos galaxias irregulares en plena fusión que se encuentran a  $-19^\circ$  de declinación en la constelación de Corvus, a una distancia estimada de entre 45 y 80 millones de años-luz. Deben su nombre a las largas líneas de gas, polvo y estrellas que llevan tras de

sí cada una de las galaxias, las cuales recuerdan a las antenas de un insecto. Se cree que la fusión, que empezó hace cientos de millones de años, probablemente terminará con los núcleos unidos en una galaxia elíptica supergigante y con las antenas como galaxias satélites.

Existen también otras galaxias reconocibles con telescopios de aficionado, pero cuyo interés no es tanto su espectacularidad como sus características. Un caso claro es la galaxia elíptica supergigante M87. Se trata de la galaxia más luminosa del grupo principal del cúmulo de Virgo, cuyo centro se encuentra a aproximadamente  $+13^\circ$  de declinación en la constelación del mismo nombre, a una distancia estimada de nosotros de entre 50 y 70 millones de años-luz. Es el cúmulo dominante en el supercúmulo de Virgo, del que forma parte nuestro Grupo Local. Ocupa un área celeste con una longitud angular de varias decenas de grados, que incluye una parte importante de las galaxias del catálogo Messier. Volviendo a M87, su número de cúmulos globulares supera los diez mil, casi cien veces más que en la Vía Láctea. Cuenta asimismo con un núcleo activo, fuente de alta intensidad en frecuencias de radio. Otra de sus características destacadas es un chorro de plasma expelido a velocidades próximas a las de la luz. Todas estas características la hacen no solo una galaxia importante desde el punto de vista científico, sino también muy popular entre los aficionados a la astronomía.

Finalmente, no hay que olvidar que el número de galaxias que se han observado es muy inferior al número existente en el universo observable. A su vez, el número de galaxias que se han estudiado con detalle es todavía mucho menor. Así pues, el camino que queda por recorrer en el estudio de las galaxias es enorme, siendo este un campo que apenas cuenta con un siglo de antigüedad. Sin duda, el avance en el estudio del origen y desarrollo de las galaxias nos va a aportar muchos descubrimientos sorprendentes en los próximos tiempos, que además nos ayudarán a entender mejor la historia de nuestro universo. A día de hoy, la galaxia más lejana y antigua observada se encuentra realmente a unos 32 000 millones de años-luz de nosotros y la vemos como



era tan solo unos cuatrocientos millones de años después del Big Bang, cuando por tanto estaba más cerca. Las próximas décadas se presentan pues muy interesantes con el estudio de esta y otras galaxias todavía más lejanas a través de la siguiente generación de telescopios.

#### CAPÍTULO 4

## Nuestra galaxia: la Vía Láctea

Galileo demostró mediante un sencillo telescopio que la franja luminosa que atraviesa el cielo nocturno es efectivamente un conjunto de estrellas como ya habían intuido los antiguos griegos. Más de cuatro siglos después, tenemos una visión muchísimo más completa de ese conjunto al que seguimos llamando Vía Láctea.



Hoy en día se sabe que la Vía Láctea es tan solo una de las muchísimas galaxias que forman el universo. De hecho, las teorías sobre la forma y estructura de nuestra galaxia se inspiran en la observación de las otras. Desde la Tierra, la vemos como una franja luminosa que divide la esfera celeste en dos hemisferios aproximadamente iguales. Es el resultado de estar viendo una estructura en forma de disco desde su interior. Se trata de un disco con más de cien mil años-luz de longitud y unos brazos espirales que limitan nuestra visión, como si nos encontráramos en un laberinto. El Sol se encuentra precisamente en el límite de uno de estos brazos, siendo tan solo una entre los centenares de miles de millones de estrellas que componen nuestra galaxia. Determinar su masa conjunta no es tarea sencilla ya que, además de las estrellas, hay que considerar una gran cantidad de material interestelar y materia oscura. Es por ello que las estimaciones realizadas pueden oscilar desde cientos de miles de millones hasta billones de masas solares, dependiendo también de dónde se ponga el límite.

Algunas de las características más destacadas de nuestra galaxia en comparación con las otras espirales son que tiene



un núcleo de tamaño intermedio, brazos ligeramente separados y está rodeada por una estructura anular poco definida. Además, cuenta con un importante halo esferoidal de estrellas, gas caliente y materia oscura. En el núcleo, parece que existe una estructura barrada con un agujero negro supermasivo en su interior. En el disco, se concentran las estrellas jóvenes y los cúmulos abiertos, ya que es donde básicamente tiene lugar la formación estelar a partir del material interestelar. Formación que es más intensa en aquellas zonas con mayor densidad de material, como en los brazos espirales. En el halo, la densidad de gas frío es demasiado baja para que exista formación estelar, así que este está compuesto principalmente por estrellas viejas y cúmulos globulares.

Finalmente, parece haber consenso en que existe una alta probabilidad de que algunas estrellas de entre la multitud que forman nuestra galaxia puedan albergar planetas similares al nuestro con algún tipo de vida. Se ha especulado mucho sobre los límites bajo los que podría darse la vida extraterrestre y cuáles serían sus posibles características, sin embargo, la mejor manera que seguimos teniendo de medir la habitabilidad de un planeta es comparando sus características con las del nuestro. Los datos actualmente considerados indican que cada estrella de la Vía Láctea tendría una media de aproximadamente un planeta orbitando a su alrededor. De todos ellos, unos diez mil millones estarían orbitando alrededor de estrellas similares al Sol con características parecidas a las de la Tierra. Parece pues poco probable que estemos solos en nuestra galaxia. Sin embargo, las distancias interestelares son tan grandes que harían muy difícil la interacción, en caso de que algún día llegásemos a encontrar vida extraterrestre.

## **LAS DIMENSIONES DE NUESTRA GALAXIA**

La Vía Láctea se nos aparece como una franja luminosa de unos 30° de ancho que atraviesa el cielo nocturno. Divide la esfera celeste en dos hemisferios aproximadamente iguales, extendiéndose

por una región que comprende unas treinta constelaciones. Llega hasta la de Casiopea en el hemisferio norte y a la de la Cruz del Sur en el hemisferio sur, lo que supone una inclinación del plano galáctico respecto al plano ecuatorial celeste de aproximadamente unos 62,9°. El centro galáctico coincide con la parte más luminosa situada en la constelación de Sagitario. La dirección diametralmente opuesta se encuentra en la constelación del Auriga. La luminosidad de la Vía Láctea es relativamente baja, así que en presencia de la Luna su visión se puede ver dificultada y en entornos urbanos con elevada contaminación lumínica ello es simplemente imposible. Se calcula que más de un tercio de la humanidad no puede contemplarla desde sus lugares de residencia. Las mejores condiciones para su observación se dan en zonas poco pobladas, cuando la Luna está por debajo del horizonte.

Hoy en día se sabe que la Vía Láctea es una galaxia espiral barrada, siendo una de las tres mayores del Grupo Local, por detrás de la de Andrómeda (M31) y por delante de la del Triángulo (M33). La galaxia de Andrómeda está situada aproximadamente a unos 2,5 millones de años-luz de distancia y la del Triángulo a unos 2,8 millones de años-luz, aunque no hay que tomar estas distancias como exactas, ya que existe un importante grado de indeterminación. La distancia angular entre M31 y M33 es de unos 15°, lo que con los valores anteriores da una distancia del orden de 750 000 años-luz. Parecen estar gravitatoriamente vinculadas, con la segunda en una órbita de alta excentricidad alrededor de la primera. Además, como se ha dicho, la galaxia de Andrómeda se está acercando hacia nosotros y podría acabar fusionándose con la Vía Láctea dentro de unos miles de millones de años. Por otro lado, el Grupo Local cuenta también con varias decenas de galaxias menores, muchas de las cuales son galaxias satélites que orbitan alrededor de una de las tres mayores o de su centro de masas. El número

Si miramos hacia la Vía Láctea a través de los ojos de Carl Sagan, tendremos una sensación en el pecho de que es algo mucho más grande que nosotros. Y lo es. Pero no es algo sobrenatural.

**RICHARD DAWKINS**



## LA VÍA LÁCTEA EN LA HISTORIA

La observación de la franja luminosa en el cielo nocturno conocida como Vía Láctea se remonta a los orígenes del hombre. De hecho, ha sido conocida por todas las culturas, que le han asignado otros nombres, como por ejemplo Río de Plata en las culturas orientales.

### ¿Un conjunto de estrellas?

Una de las primeras personas en sugerir que esa franja podía estar formada por un conjunto de estrellas como las otras, pero más distantes, fue Demócrito en la antigua Grecia. Durante siglos, esta posibilidad fue tratada como una simple hipótesis, ya que muchos incluso pensaban que era un fenómeno atmosférico. Los siguientes avances se produjeron en el mundo árabe a partir del siglo xi, después de que Alhacén resolviera la naturaleza no atmosférica de la Vía Láctea al no poder medir su paralaje. Aunque algunos atribuían su apariencia a la separación, tamaño o naturaleza difusa de las estrellas, también hubo quien acertadamente la atribuyó a la refracción atmosférica, como se puede observar en las conjunciones planetarias. Las primeras evidencias de que realmente se trataba de un enorme conjunto de estrellas llegaron ya en el siglo xvii. El honor correspondió a Galileo, uno de los científicos más importantes de todos los tiempos y uno de los primeros en realizar observaciones sistemáticas con un telescopio. En el siglo xviii, Thomas Wright propuso que las estrellas de la Vía Láctea se mantenían unidas por fuerzas gravitatorias y rotaban alrededor de un centro de masas, como ocurría con el sistema solar, pero a una escala mucho mayor. Desde nuestra posición interior, percibíamos como una franja lo que era en realidad algo parecido a un disco. Wright también especuló con que



Esquema de la forma de la Vía Láctea y la ubicación del sistema solar, consideradas en la actualidad.

algunas de las manchas con aspecto nebuloso visibles en el cielo eran estructuras similares a la Vía Láctea, o sea galaxias.

### ¿Qué forma tiene y qué lugar ocupamos?

Uno de los primeros intentos de describir la forma exacta de nuestra galaxia y la posición que ocupamos en ella tuvo lugar a finales del siglo xviii y para llevarlo a cabo William Herschel realizó un recuento del número de estrellas en diferentes regiones del espacio. Las primeras aproximaciones precisas del tamaño de la Vía Láctea y la ubicación del Sol se realizaron ya en el siglo xx. Cabe destacar el trabajo de Harlow Shapley quien, basándose en el estudio de los cúmulos globulares, concluyó que la forma de nuestra galaxia se aproximaba a la de un disco plano de varios cientos de miles de años-luz de longitud, con el Sol lejos del centro. Actualmente, gracias a los potentes instrumentos usados en la observación de la Vía Láctea y de otras galaxias, contamos incluso con información bastante precisa de su estructura espiral global.



Imagen de la Vía Láctea con una resolución y exposición que permiten intuir que se trata de un conjunto de estrellas. Es una visión muy distinta a la que se tiene sin aparatos de observación, única posibilidad existente antes de Galileo.



de estas galaxias podría ser mucho mayor que el de las que se conocen en la actualidad, ya que por su tamaño son difíciles de detectar a la distancia en que se encuentran. Sin ir más lejos, en 2016 se descubrió una nueva galaxia en la constelación de Virgo a una distancia aproximada de unos 280 000 años-luz. La galaxia Virgo I es una enana casi esférica con una luminosidad muy débil, tanto que se convirtió en la menos luminosa confirmada hasta ese momento. Entre las galaxias enanas del Grupo Local destacan por su visibilidad las dos que forman el conjunto llamado Nubes de Magallanes, algo más próximas que Virgo I. Aunque parecen más bien estar de paso, su interacción gravitatoria con la Vía Láctea se manifiesta en forma de importantes deformaciones. Otras galaxias enanas aún más cercanas, tanto que están siendo absorbidas por la Vía Láctea, son las de Sagitario y del Can Mayor. Aunque esta última es la más cercana de todas, no fue descubierta hasta el siglo XXI, ya que se encuentra justamente en el plano de la Vía Láctea, escondida tras altas concentraciones de estrellas, gas y polvo.

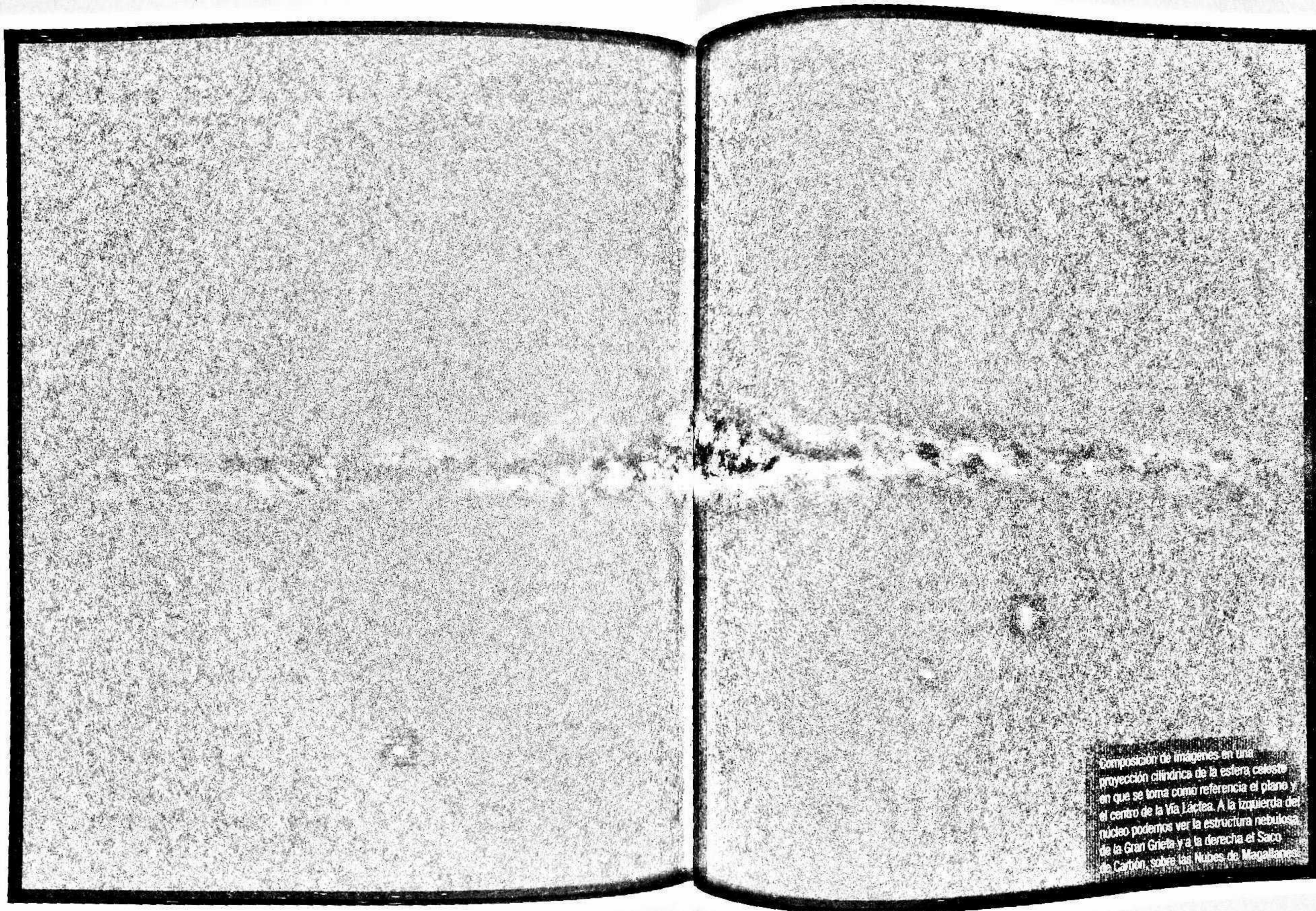
La longitud de la Vía Láctea puede oscilar entre 100 000 y casi 200 000 años-luz, dependiendo de dónde se considere su límite. La gama alta de ese valor se obtiene considerando una estructura anular de estrellas descubierta recientemente oscilando a ambos lados del plano galáctico, alrededor de la parte más densa del disco. El grosor del disco es del orden de los mil años-luz, lo que para hacernos una idea equivaldría aproximadamente a las proporciones de uno o varios discos compactos apilados, dependiendo de la parte considerada. El disco no se termina de una forma brusca, sino que la concentración de estrellas disminuye progresivamente con la distancia al centro galáctico, aunque de forma más acusada a partir de los 40 000 años-luz. El material interestelar tampoco se distribuye uniformemente, existiendo una zona de gas frío con un grosor de centenares de años-luz y una zona de gas caliente con un grosor de miles de años-luz. Además, envolviendo al disco galáctico, encontramos un halo esferoidal de estrellas, gas caliente y materia oscura que se extiende centenares de miles de años-luz.

En cuanto al número de estrellas, las estimaciones actuales se mueven entre los cien y cuatrocientos mil millones. Este ran-

go tan amplio es debido a que es difícil determinar la cantidad exacta de estrellas poco masivas en las partes de la galaxia más alejadas del sistema solar, más teniendo en cuenta que en el plano galáctico su visión se ve obstaculizada por el núcleo y las concentraciones de polvo de los brazos. Esta misma incertidumbre se traslada a la masa visible, que se estima en más de varios centenares de miles de masas solares, de las cuales la mayor parte correspondería a estrellas y el resto a material interestelar. En cuanto a la masa total, incluyendo la materia oscura que se extiende hasta varios centenares de miles de años-luz del centro, podría ascender hasta varios billones de masas solares. Un método para calcular la masa contenida en un cierto volumen de la galaxia es medir la velocidad a la que se mueven las estrellas a su alrededor. Mediante estudios sobre la velocidad de las estrellas en el halo realizados en 2010, se estimó que la masa contenida en un radio de 260 000 años-luz alcanza unas  $7 \cdot 10^{11}$  masas solares. Según estimaciones más recientes, la masa total podría incluso llegar hasta  $4,5 \cdot 10^{12}$  masas solares, esto es 4,5 billones.

En cuanto a la situación del sistema solar, parece que se encuentra en el límite de uno de los brazos espirales, orbitando alrededor del centro galáctico a una distancia de aproximadamente 26 500 años-luz y a una velocidad de unos 220 km/s. Esto da un periodo orbital de más de 200 millones de años, aunque la órbita solar no está contenida en un plano sino que oscila levemente debido a la compleja interacción gravitatoria con las distintas partes de la galaxia. En cualquier caso, la dirección en la que se mueve está inclinada aproximadamente unos  $60^\circ$  respecto a los planos orbitales de los planetas, cuya trayectoria en la galaxia es más bien helicoidal. Este movimiento plantea también la cuestión de cómo interactúa el campo electromagnético solar con el campo electromagnético interestelar. Por un lado, el campo interestelar está curiosamente propagado por rayos cósmicos, cuyo origen parece ser sobre todo extragaláctico. Concretamente, proceden de la constelación de Centauro, donde se ha localizado como su posible origen una galaxia con núcleo activo, con emisiones mucho más intensas que las del núcleo de la propia Vía Láctea. Por otro lado, el cam-





Composición de imágenes en una proyección cilíndrica de la esfera celeste en que se toma como referencia el plano y el centro de la Vía Láctea. A la izquierda del núcleo podemos ver la estructura nebulosa de la Gran Grieta y a la derecha el Saco de Cartón, sobre las Nubes de Magallanes.



po magnético solar se conoce como *heliosfera* y consiste básicamente en la región dominada por el *viento solar*, el flujo de partículas cargadas eléctricamente que emite nuestra estrella de forma constante. La heliosfera se extiende con el viento solar hasta más allá de las órbitas planetarias, aunque los cometas de periodo largo pueden pasar la mayor parte de sus vidas en su exterior. Una de las fuentes de información más valiosas que tenemos sobre cómo se produce la transición entre ambos campos son los datos que aún siguen enviando las naves espaciales Voyager 1 y 2, cuarenta años después de su lanzamiento. Ambas han atravesado una zona donde las partículas se desaceleran hasta velocidades subsónicas aumentando su densidad, siempre mucho menor que la de cualquier vacío creado en la Tierra. Este hecho se ha interpretado como una onda de choque. En la zona de transición antes de llegar al espacio interestelar, la velocidad de las partículas llega a ser nula y se han detectado burbujas gigantes que responderían a estructuras magnéticas autónomas. Volviendo al movimiento del Sol en la galaxia, se creyó durante mucho tiempo que determinaría la forma de la heliosfera, provocando un arco de choque y una cola en el medio interestelar. Sin embargo, recientemente se han realizado estudios que indican que la orientación del campo magnético interestelar propagado por los rayos cósmicos tendría una importancia crucial. Estos estudios se basan en datos tomados por las naves Cassini e IBEX sobre el viento solar rebotado en los límites de la heliosfera y retornado como átomos neutros de hidrógeno.

## ESTRUCTURA GALÁCTICA

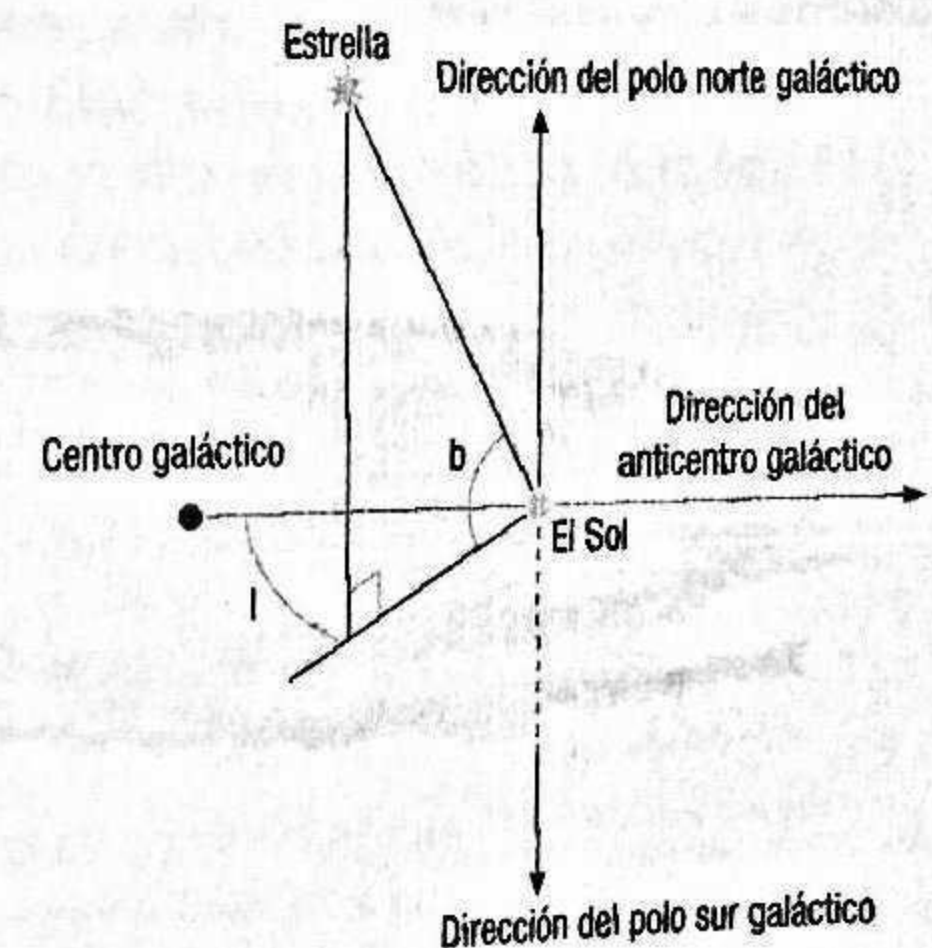
La Vía Láctea está clasificada como una galaxia del tipo SB(rs)bc según el sistema de Hubble-de Vaucouleurs. Es decir, se trata de una galaxia espiral barrada con un núcleo de tamaño intermedio y brazos ligeramente separados, rodeada por una estructura anular poco definida. En cuanto al núcleo, se empezó a sospechar que se trataba de una galaxia espiral barrada en lugar de

## SISTEMA DE REFERENCIA GALÁCTICO

Disponemos de un sistema de referencia que coloca sus ejes en relación con el plano de la Vía Láctea y su origen en el sistema solar, el cual usa un sistema de coordenadas polares similar al sistema de longitud y latitud. La longitud galáctica ( $0^\circ \leq l < 360^\circ$ ) se define sobre el plano de la Vía Láctea con el origen aproximadamente en la línea que va al centro galáctico y el sentido antihorario desde el polo norte galáctico, el cual está en el hemisferio norte ecuatorial. La latitud galáctica ( $-90^\circ \leq b \leq +90^\circ$ ) se define como el ángulo respecto al plano galáctico. En relación con el sistema de referencia J2000, el origen de coordenadas se halla a 17 h 45 m de ascensión recta y  $-28^\circ 56'$  de declinación, ligeramente desplazado respecto al centro galáctico en el punto conocido como Sagitario A\* ( $l = 359^\circ 56'$ ,  $b = -0^\circ 2'$ ).

### Cuadrantes

Según la longitud galáctica, se definen cuatro cuadrantes en la Vía Láctea: el primero (GQ1) desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$ , el segundo (GQ2) desde  $90^\circ$  hasta  $180^\circ$ , el tercero (GQ3) desde  $180^\circ$  hasta  $270^\circ$  y el cuarto (GQ4) desde  $270^\circ$  hasta  $360^\circ$ , o lo que es lo mismo,  $0^\circ$ . Además, cada uno de los cuadrantes se puede dividir por el plano galáctico dando lugar a la parte norte (N) y a la parte sur (S). Así pues, las constelaciones del zodiaco, por ejemplo, están distribuidas como sigue: Sagitario, Capricornio y Acuario en SGQ1; Piscis, Aries y Tauro en SGQ2; Géminis, Cáncer y Leo en NGQ3; Virgo, Libra y Escorpio en NGQ4.



Esquema del funcionamiento del sistema de coordenadas galáctico basado en la longitud galáctica ( $l$ ) y la latitud galáctica ( $b$ ).

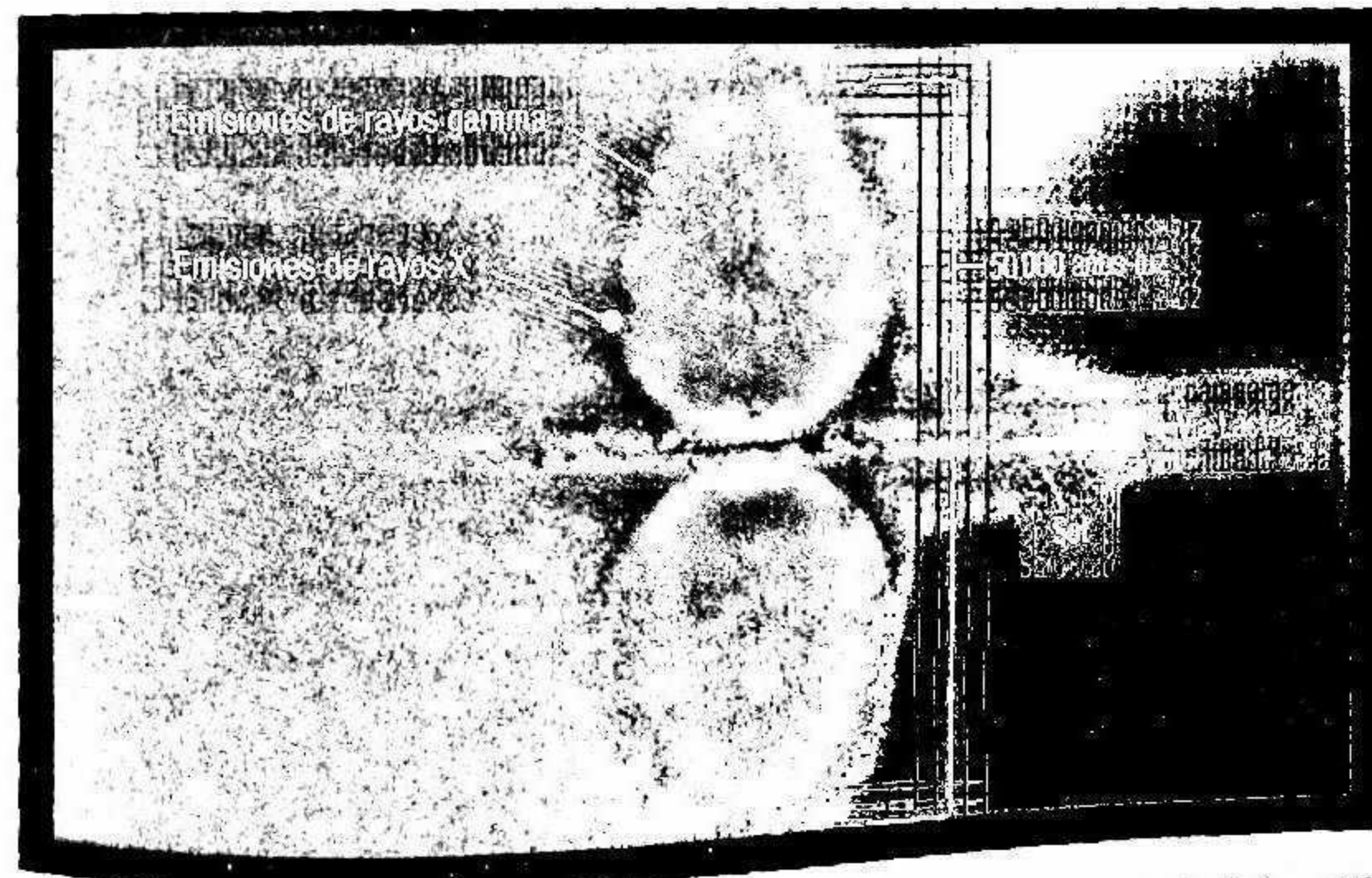


una galaxia espiral en la década de 1990. Gracias al telescopio espacial Spitzer, se pudo ver en 2005 que la barra central es incluso más larga de lo que se había creído con anterioridad. En cuanto a los brazos, no es nada sencillo determinar desde dentro cuál es su morfología, ya que nuestra visión está limitada por acumulaciones de gas y polvo interestelar. Entre ellas destacan las estructuras nebulosas de la Gran Grieta, en el primer *cuadrante* del sistema de referencia galáctico, o del Saco de Carbón en el cuarto (véase la imagen de las págs. 130-131). Estas estructuras son percibidas desde nuestra posición como áreas oscuras frente a la franja luminosa, como si nos encontráramos en un laberinto. Sin embargo, aunque el medio interestelar es opaco a la luz, es casi transparente a las ondas de radio, lo cual permite realizar un mapa de la distribución de las nubes de gas frío con hidrógeno neutro H I, que emiten radiación en esa frecuencia. Por otro lado, además del núcleo y el disco galáctico donde se encuentran los brazos, nuestra galaxia cuenta con un halo esferoidal de estrellas, gas caliente y materia oscura.

El núcleo consiste en una región densamente poblada de estrellas viejas alrededor del centro galáctico, situado en dirección al punto conocido como Sagitario A\* (el asterisco forma parte del nombre). Se cree que corresponde a un agujero negro supermasivo con varios millones de veces la masa solar, según se estima a partir del movimiento de material a su alrededor. La radiación electromagnética que nos llega desde allí es intensa en términos absolutos, pero débil para un agujero negro supermasivo. Esto se puede explicar por la escasez de gas y polvo en sus inmediaciones, provocando una tasa de acreción extremadamente baja comparada con la de los núcleos activos de otras galaxias, del orden de varias millonésimas de masa solar en un año. Parece ser que el núcleo consta de una barra central, aunque su forma no se conoce con exactitud, pudiendo oscilar su longitud desde 5 000 hasta 35 000 años-luz y su ángulo desde 10° hasta 50°. Algunos mantienen que está dividida en dos partes diferenciadas, aunque también existen indicios de que ello no sería especialmente destacado. Parece asimismo que alrededor de la barra central existe una zona donde se concentra gran parte del

hidrógeno diatómico y de la formación de estrellas en nuestra galaxia, que sería la más luminosa vista desde el exterior. Recientemente, se han detectado emisiones de radiación electromagnética de alta frecuencia en dos zonas elipsoidales de 25 000 años-luz de longitud a ambos lados del plano galáctico, cerca del centro (figura 1). Su origen es todavía tema de debate, habiéndose sugerido varias hipótesis que incluyen desde expulsiones de gas asociadas a la formación de los cúmulos estelares próximos al centro hasta la existencia en el pasado de un chorro de partículas proveniente del agujero negro central. En 2015, la NASA anunció la detección de una punta de emisión de rayos X centenares de veces más intensa de lo habitual desde Sagitario A\*. Las hipótesis que se barajan para dar explicación a este evento van desde la caída de un asteroide en el agujero negro hasta la dinámica de las líneas de campo magnético en el flujo de gas entrante.

FIG. 1

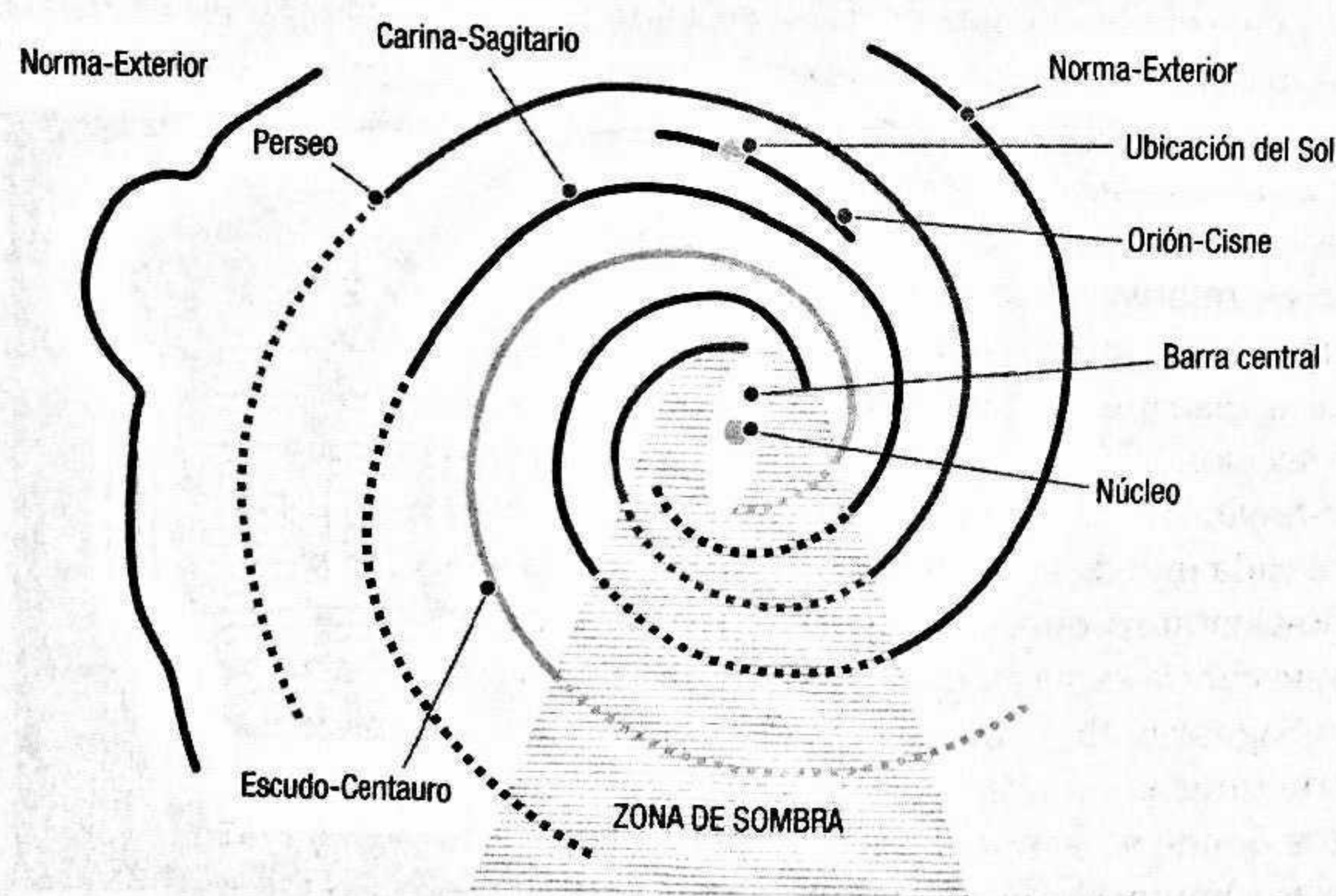


Esquema de las dos burbujas gigantes origen de las emisiones de radiación electromagnética de alta frecuencia a ambos lados del plano galáctico.



El disco está organizado en diversos brazos espirales donde se concentran el medio interestelar y la formación de estrellas. Las espirales logarítmicas se caracterizan por presentar un ángulo constante entre la perpendicular a un punto y la línea que lo une al centro. En el caso de la Vía Láctea este valor oscilaría en torno a  $13^\circ$ , sin embargo, parece ser que el patrón espiral logarítmico no se cumple a la perfección en nuestra galaxia. Por ejemplo, se cree que el brazo en el que nos encontramos es una ramificación y que es bastante probable que esta estructura se repita en otras partes. Así pues, los brazos de la Vía Láctea presentarían un cierto grado de irregularidad como se ha observado en otras galaxias, con ramificaciones, fusiones y giros inesperados. Se piensa que existen dos brazos principales, que han sido bautizados como Perseo y Escudo-Centauro, así como

FIG. 2



Esquema de la distribución estimada de los brazos de la Vía Láctea según lo observado desde la Tierra.

dos secundarios llamados Norma-Exterior y Carina-Sagitario (figura 2). Si bien esta es la distribución más aceptada, lo que percibimos en realidad son fragmentos de brazos que probablemente se juntan en la zona de sombra detrás del núcleo galáctico. El brazo local o ramificación donde estamos situados recibe el nombre de Orión-Cisne. Se ha sugerido que existen dos tipos de comportamientos diferenciados en los brazos de nuestra galaxia. Los tramos interiores rotarían más deprisa y los exteriores más despacio. Las características irregulares de nuestro brazo local vendrían dadas por estar situado en la zona de transición entre ambos. Por otro lado, en 2004 se identificó un nuevo tramo exterior que probablemente forma parte del brazo de Norma-Exterior. Además, se han identificado alrededor del núcleo galáctico dos ramales centrales situados a unos diez mil años-luz del centro. El ramal central cercano fue descubierto a mediados del siglo xx en el cuarto cuadrante y se estima que se expande hacia el exterior a una velocidad de 50 km/s. Contiene grandes cantidades de gas pero no se ha detectado gran actividad de formación estelar. El ramal central lejano no fue descubierto hasta principios del siglo xxi, en el primer cuadrante.

Los brazos espirales tienen una alta concentración de material interestelar y formación de estrellas, por lo que su población estelar es relativamente joven, aunque los de Perseo y Escudo-Centauro tienen un mayor contenido de estrellas viejas. Para estimar la distribución de estrellas en los brazos, se han estudiado las secciones de los tramos interiores de Escudo-Centauro y Carina-Sagitario, realizando observaciones en la dirección tangente a cada uno de ellos. Según los últimos trabajos, el brazo de Escudo-Centauro cuenta con un tercio de gigantes rojas más de lo que cabría esperar, pero no ocurre lo mismo en el brazo de Carina-Sagitario. En cuanto al material interestelar, se concentra en estructuras nebulosas que pueden albergar diversos cúmulos abiertos donde se generan las nuevas estrellas. Una de las más extensas y luminosas es la de la Quilla, situada en la constelación del mismo nombre, conocida también como Carina. Se encuentra a una distancia de entre 6000 y 10000 años-luz en el brazo de Carina-Sagitario y, aunque es más luminosa que la de Orión, es



algo menos conocida por encontrarse en el hemisferio sur. Entre sus estrellas más destacadas encontramos Eta Carinae, una de las estrellas más luminosas y masivas de nuestra galaxia. Rodeando a Eta Carinae podemos encontrar la estructura nebulosa del Homúnculo. Según se cree es masa eyectada en una gran explosión que convirtió a esta estrella en la segunda más luminosa del cielo en 1843 por un breve periodo de tiempo. Eta Carinae probablemente termine con una explosión mucho más violenta que una supernova (*hipernova*) en unos pocos cientos de miles de años, o incluso antes.

En el límite exterior de los brazos espirales se encuentra el anillo de Monoceros, con una masa 100 millones de veces la solar. Tiene una forma filamentosa compleja que da tres veces la vuelta al disco galáctico. No fue descubierto hasta principios del siglo XXI y aún está en discusión cuál es su naturaleza. Algunos creen que podría consistir en un flujo de materia de la galaxia enana de Can Mayor, en un proceso de fusión con la Vía Láctea. De hecho, esta galaxia fue descubierta mientras se estudiaba el anillo. Se sabe que la galaxia de Sagitario deja un rastro de desecho galáctico a lo largo de su órbita polar alrededor de la Vía Láctea, lo cual ha llevado a creer que esta podría ser la naturaleza del anillo de Monoceros en relación con la galaxia de Can Mayor. Sin embargo, ello está aún en discusión y otros creen que simplemente se trata de una estructura relacionada con el propio disco galáctico, más ancho e irregular de lo que se consideraba con anterioridad. Recientemente, se han presentado estudios que indican que el disco galáctico presenta pliegues que incluyen el anillo de Monoceros. Según este modelo el disco galáctico podría extenderse a hasta casi 200 000 años-luz de longitud. Esta reconsideración del tamaño de la Vía Láctea es consistente con el reciente descubrimiento de que el disco de la galaxia de Andrómeda es mucho más extenso de lo que se había creído. No hay que olvidar que muchas de las teorías sobre la forma y estructura de nuestra galaxia se han gestado gracias a la observación de las otras.

En cuanto al halo esferoidal, la densidad de gas suficientemente frío para colapsar en estrellas es escasa, por lo que

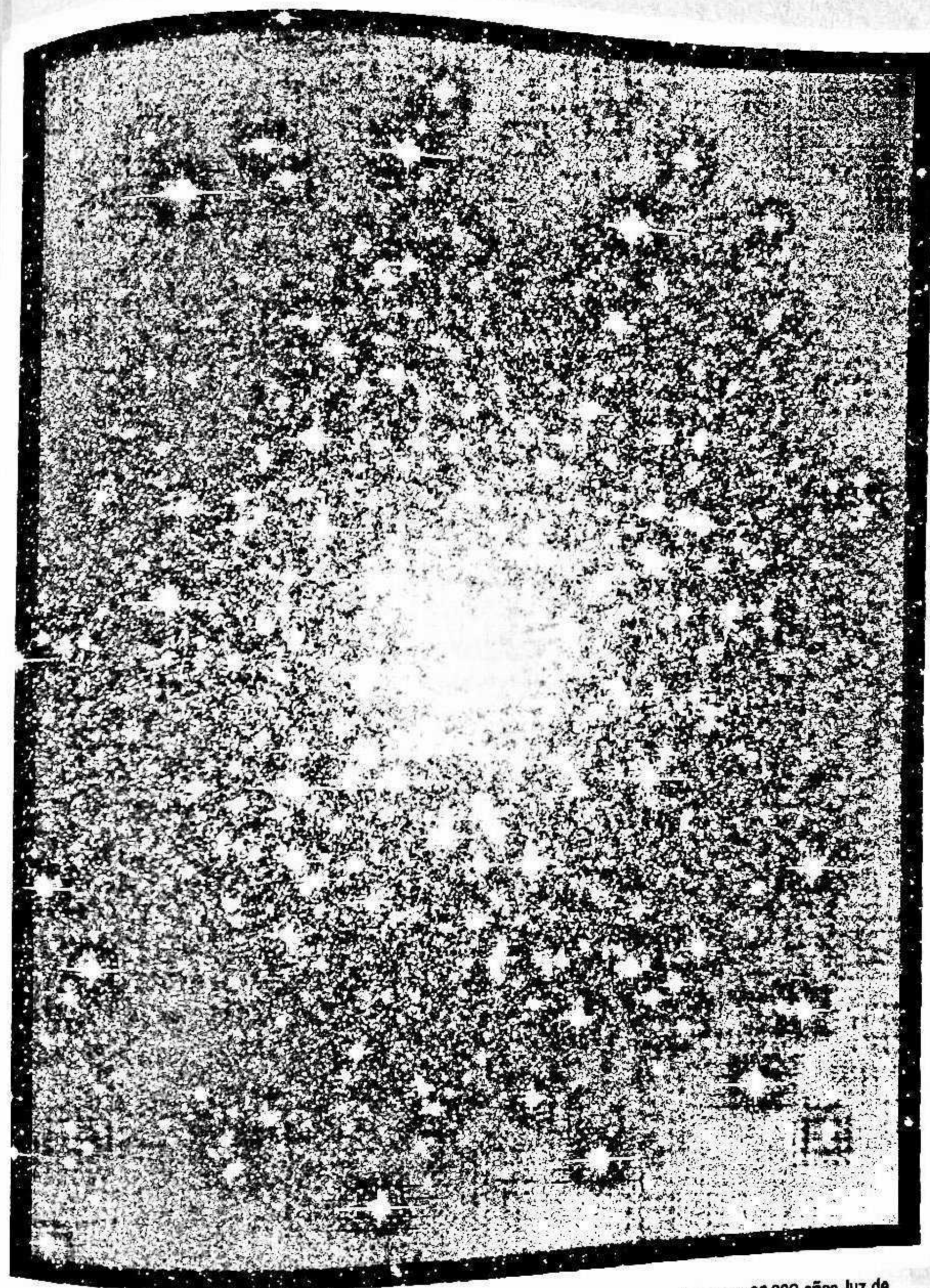


Imagen del cúmulo globular M2 situado en la constelación de Acuario, aproximadamente a unos 38 000 años-luz de nosotros. Se encuentra en el halo de la Vía Láctea, cuenta con unas 150 000 estrellas y es uno de los mayores cúmulos globulares conocidos. Otra de sus peculiaridades es que tiene 13 000 millones de años, lo que lo coloca entre los más antiguos de nuestra galaxia.



apenas existen cúmulos abiertos ni tiene lugar la formación de estrellas. Así pues, las estrellas del halo son viejas y pueden encontrarse agrupadas en cúmulos globulares, entre los que se encuentran varios objetos del catálogo Messier, como por ejemplo el M2 (véase la imagen de la pág. 139). Aunque la mayoría se halla a menos de 100 000 años-luz del centro de la galaxia, se han encontrado cúmulos globulares a hasta 200 000 años-luz. La dinámica del halo es muy distinta a la del disco, teniendo casi la mitad de los cúmulos órbitas retrógradas, es decir, en el sentido contrario al predominante en el disco. Además, estas órbitas pueden ser complejas, a diferencia de las órbitas planetarias elípticas a las que estamos acostumbrados. Las estrellas y cúmulos del halo pueden encontrarse temporalmente en el disco, ya que sus órbitas los llevan a cruzarlo periódicamente. Se pueden distinguir del resto por su edad, composición y velocidad.

Recientemente se ha detectado en el interior del halo una región con alta concentración estelar con una orientación casi perpendicular al disco, a unos 30 000 años-luz de distancia. Observada desde la Tierra, ocupa un área con una longitud de varias decenas de grados y se encuentra en dirección a la constelación de Virgo, por lo que se la viene llamando *corriente estelar de Virgo*. A pesar de la gran superficie que ocupa, no se había detectado hasta ahora debido a su relativamente baja densidad de estrellas. Se cree que podría tratarse de los restos de una galaxia enana que se está fusionando con la Vía Láctea. Se encuentra casi en el plano orbital de la galaxia enana de Sagitario, aunque a una cuarta parte de su distancia respecto al centro galáctico. Por ese motivo, se ha sugerido que podría ser el remanente dejado precisamente por esa galaxia.

El gas del halo puede llegar a alcanzar temperaturas del orden de los 2,5 millones de kelvins, siendo básicamente detectable a través de telescopios espaciales de rayos X. Estudios recientes indican que se extiende centenares de miles de años-luz y está girando en la misma dirección que el disco, solo que a una velocidad algo menor. La reciente detección de esta rotación resulta de sumo interés porque va a permitir realizar mo-

delos teóricos más precisos sobre la formación y el desarrollo de nuestra galaxia. La masa total de gas caliente podría ser equivalente al resto de materia ordinaria de la Vía Láctea. Aun con eso, parece que la masa total de nuestra galaxia es mucho mayor y estaría dominada por una gran cantidad de materia oscura. Se estima que en el universo la cantidad de materia oscura es alrededor de cinco veces mayor que la cantidad de materia ordinaria. Este sería también el caso de la Vía Láctea si se confirman las estimaciones para la masa de gas caliente en su halo.

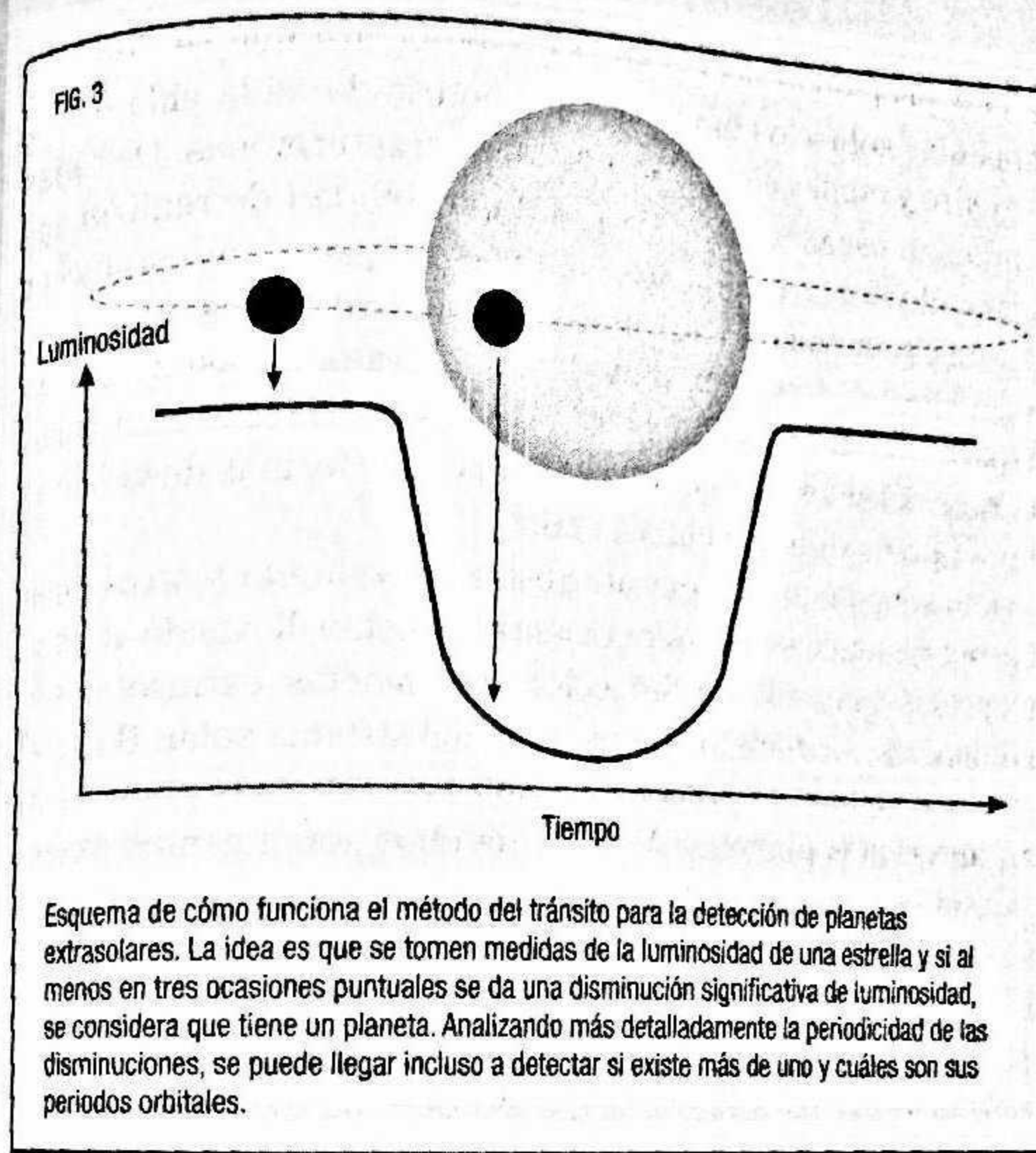
## POSIBILIDADES DE VIDA

La posibilidad de que exista vida en el exterior de nuestro planeta se lleva planteando desde hace siglos. Uno de los primeros en sugerir esta idea fue Giordano Bruno. Según Bruno, en un universo donde todas las estrellas estuvieran rodeadas de su propio sistema planetario, habría otros astros como la Tierra conteniendo «animales y habitantes». Actualmente, una parte importante de la comunidad científica considera posible e incluso probable que exista alguna forma de vida en otros astros con las condiciones adecuadas. Sin embargo, no se dispone aún de ninguna prueba, así que tan solo se pueden realizar conjeturas o estimaciones al respecto. Los únicos intentos de búsqueda directa han tenido lugar en otros cuerpos del sistema solar con condiciones para albergar formas de vida primitiva. Aunque han existido diversas misiones de superficie y orbitales en Marte con esa intención, algunas todavía operativas, no se ha encontrado hasta el momento ninguna evidencia. Otros posibles lugares en los que podrían existir son los depósitos de agua bajo las capas de hielo de algunos satélites de Júpiter y Saturno, aunque las pocas misiones que han llegado hasta estos planetas no permiten sacar ninguna conclusión. Toda la información recopilada en estas misiones ha servido para refinar una serie de hipótesis sobre el origen de la vida que siguen siendo eminentemente teóricas. En este sentido, la *exobiología*



es la especialidad dentro de la *astrobiología* que se dedica a especular sobre los límites en que podría darse la vida extraterrestre y cuáles serían sus posibles características. De todas formas, la escasez de datos y la imposibilidad de realizar experimentos para refutar las hipótesis no permiten establecer una disciplina científica con límites bien definidos. Las aproximaciones al tema son muy diversas, tratando aspectos tan dispares como el posible origen de la vida terrestre en otros cuerpos del sistema solar o la existencia de formas de vida con algún tipo de inteligencia más allá.

La búsqueda de vida extraterrestre no se limita a otros cuerpos del sistema solar. Actualmente se están llevando a cabo diversos programas de detección de planetas extrasolares o exoplanetas, es decir, planetas fuera del sistema solar. Hasta el momento se han descubierto ya miles de sistemas planetarios con uno o más planetas. Muchos de ellos son gigantes gaseosos con una masa igual o superior a la de Júpiter, orbitando en un periodo muy corto a poca distancia de su estrella, por lo que en ocasiones son conocidos como *júpiteres calientes*. Estos planetas son mucho más fáciles de detectar con los métodos disponibles hasta el momento que los planetas rocosos de menor tamaño como la Tierra. Los métodos más utilizados hasta la fecha han sido el de la *velocidad radial* y el del *tránsito planetario* (figura 3). El método de la velocidad radial detecta mediante el *efecto Doppler* en la luz de las estrellas su posible oscilación a consecuencia de planetas orbitando a su alrededor. El método del tránsito detecta leves disminuciones en la luminosidad de las estrellas provocadas por el paso de un planeta entre ellas y nosotros. Si bien el segundo método permite la detección de planetas más pequeños y alejados de su estrella, tan solo posibilita localizar aquellos cuyo plano orbital está dirigido de tal forma que pasa por las inmediaciones de la Tierra. Existen también otros métodos específicos para determinados tipos de estrellas, como los púlsares dejados tras la explosión de una supernova. La cuestión es que emiten regularmente ondas de radio que se pueden usar para detectar las posibles oscilaciones provocadas por planetas. La primera detección confirmada de



un planeta extrasolar se hizo alrededor de uno de estos cuerpos a finales del siglo xx.

La primera localización confirmada de un planeta extrasolar orbitando alrededor de una estrella de la secuencia principal tuvo lugar en 1995. Desde entonces el número de descubrimientos ha aumentado año tras año. Hoy en día se conocen incluso diversos sistemas con planetas cuyas condiciones son similares al nuestro. La sonda espacial Kepler lanzada en 2009 supuso un avance importante en este sentido. Durante sus primeros años, antes de que empezaran sus problemas de orientación, encontró la mayor parte de los planetas extrasolares confirmados hasta la actualidad. Entre todos ellos podemos destacar el planeta Kepler-438 b, a aproximadamente unos 470 años-luz de nosotros, el cual tiene hasta la fecha el índice de



## LA FAMILIA TRAPPIST-1

A principios de 2017 se reveló la existencia de varios nuevos planetas orbitando alrededor de la estrella Trappist-1, una enana roja situada a unos 40 años-luz de la Tierra, en la constelación de Acuario. El total de planetas conocidos hasta la fecha es de siete, todos orbitando a una distancia menor que Mercurio respecto al Sol, con periodos de pocos días, lo que hace pensar que la mayoría presentan una rotación sincrónica con su periodo orbital. Parece ser que al menos tres se encontrarían en la zona habitable (en la cual es posible la existencia de agua líquida) alrededor de la estrella y podría ser que los otros cuatro no estuvieran muy lejos.

### Formación del sistema

Las características tan especiales de este sistema han hecho plantear a los científicos cuestiones acerca de su origen. La formación de estos siete planetas con tamaños parecidos a la Tierra en las distancias tan cercanas a la estrella donde orbitan actualmente parece poco probable ya que implicaría un disco protoplanetario muy denso. Para resolver este problema y explicar también por qué todos tienen tamaños tan parecidos, ha surgido recientemente una nueva hipótesis. Los

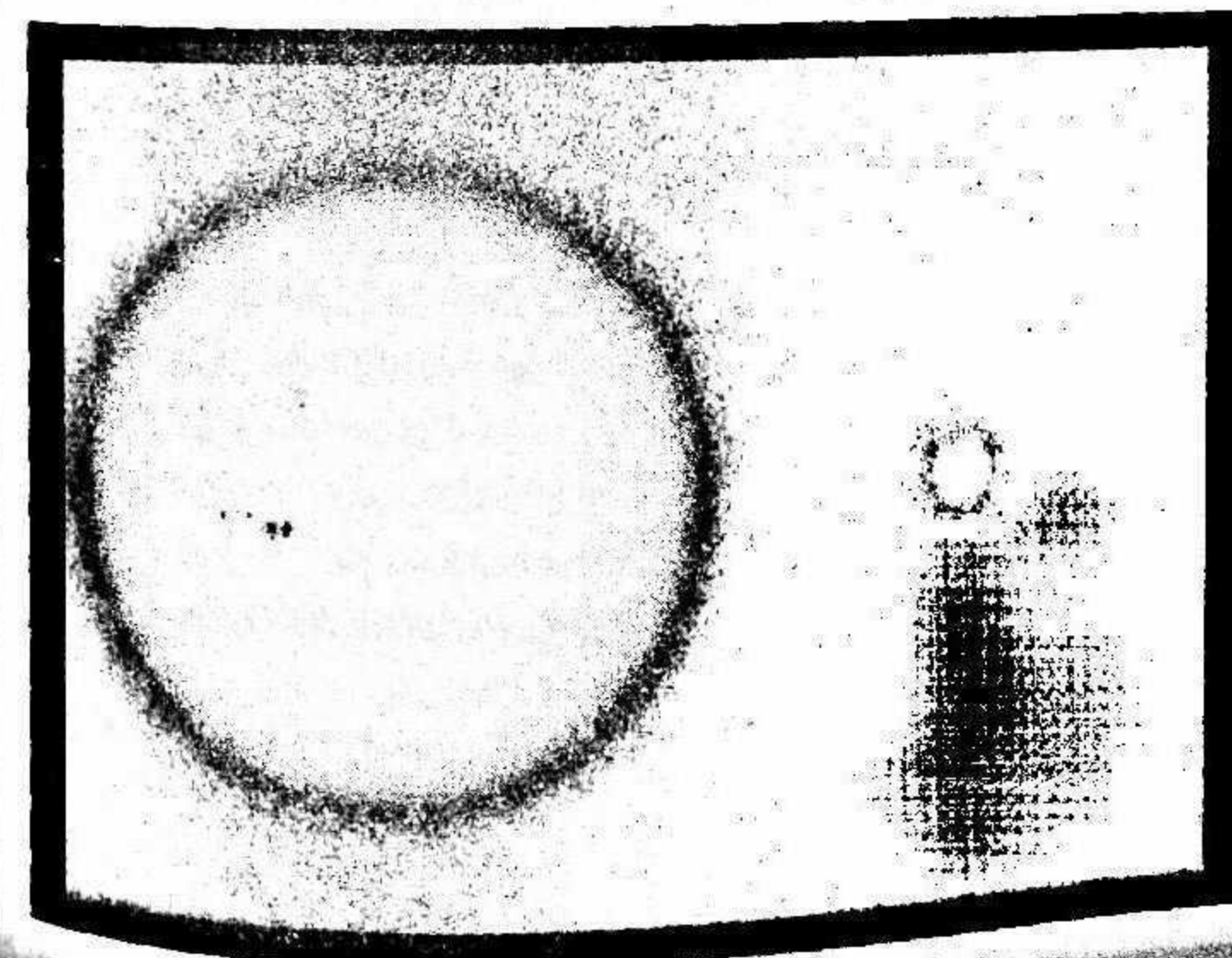
planetas se habrían ido formando en la línea de hielo a partir de rocas que habrían migrado desde zonas exteriores. Tras la formación, cada planeta habría migrado a posiciones aún más interiores, dejando lugar para la formación del siguiente por el mismo proceso.

### Una estrella diminuta

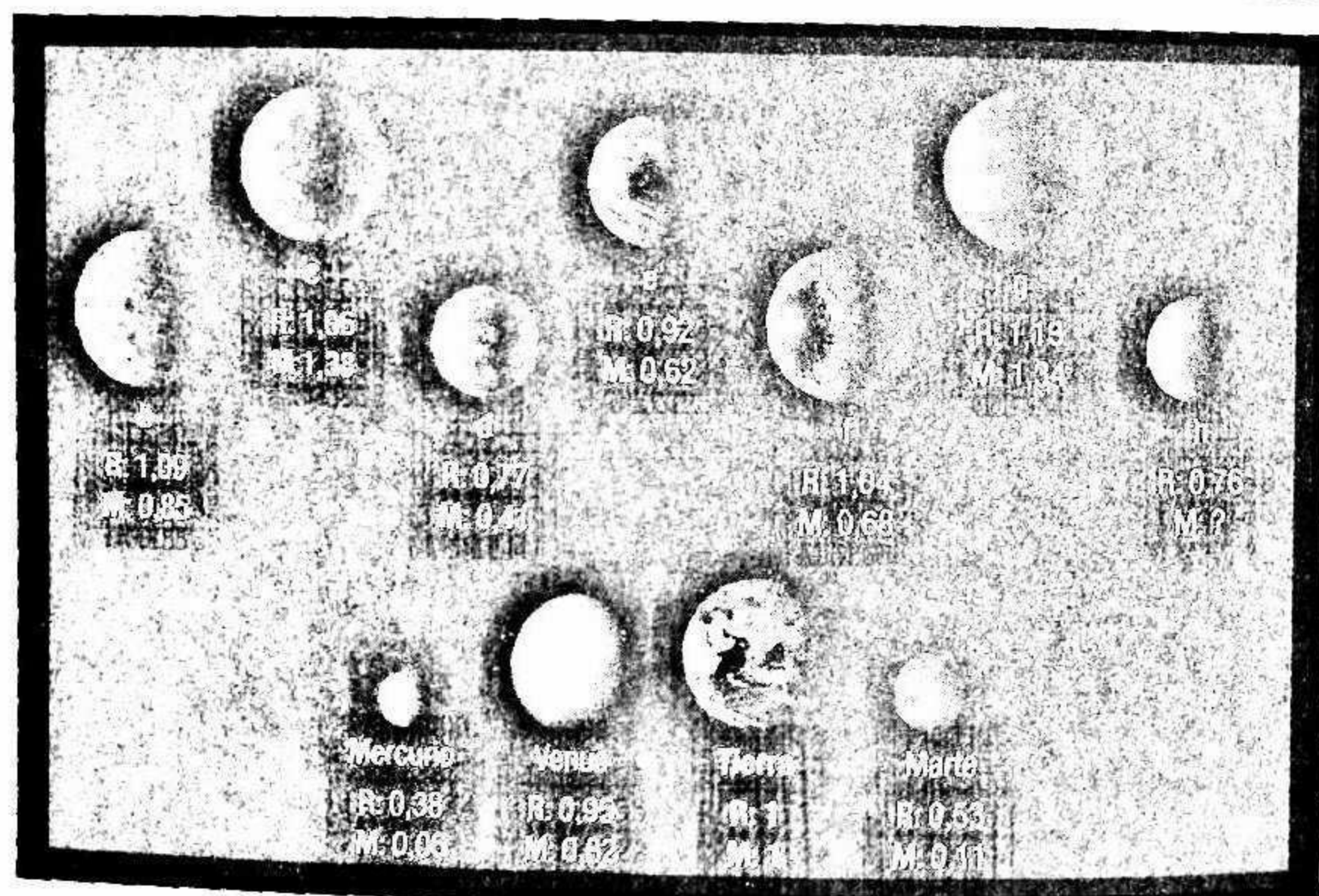
El hallazgo de Trappist-1 es significativo porque permite poner de relieve la probable existencia en el universo de un gran número de estrellas pequeñas y relativamente frías dotadas de sistemas planetarios con múltiples integrantes, lo que multiplica la cantidad de planetas que pueden llegar a existir. La citada estrella, llamada también 2MASS J23062928-0502285, apenas tiene el 11 % del diámetro del Sol, es decir, algo mayor que Júpiter, pero a pesar de que es muy débil, aún configura un sistema en el que algunos planetas rocosos, gracias a su cercanía, pueden encontrarse en la zona habitable. Situada en la constelación de Acuario, a poco más de 39 años-luz, se halla lo bastante cerca como para que los astrónomos puedan continuar obteniendo mucha información sobre ella y sus acompañantes durante los próximos años.

### Camino de descubrimiento

Los planetas de Trappist-1 fueron localizados gracias a los esfuerzos de Michaël Gillon y de su equipo del Instituto de Astrofísica y Geofísica de la Universidad de Lieja, en Bélgica. Utilizando el telescopio Trappist del Observatorio de La Silla, en Chile, especialmente diseñado para localizar planetas extrasolares por el método del tránsito, anunciaron en mayo de 2016 la existencia de tres planetas alrededor de la estrella. En febrero de 2017 se dieron a conocer otros cuatro. Entre ellos, el planeta más cercano a Trappist-1 tarda apenas un día y medio en girar a su alrededor. Es muy posible que todos se afecten gravitatoriamente entre sí, habiendo alcanzado órbitas resonantes.



Comparación, elaborada por el Observatorio Europeo Austral, entre el tamaño del Sol y el de la diminuta estrella Trappist-1.



Se muestran los radios y las masas estimados para los planetas del sistema Trappist-1 (arriba) en comparación con los de los planetas de tipo terrestre (rocosos) de nuestro sistema solar (abajo). Como unidad para el radio se usa el de la Tierra. Como unidad para la masa se usa también la de la Tierra. La apariencia gráfica de los planetas de Trappist-1 es solo imaginaria.



similitud respecto a la Tierra más elevado. Hay que tener en cuenta, no obstante, que este índice no indica la habitabilidad del planeta sino su parecido con el nuestro. Evidentemente, la Tierra tiene una alta habitabilidad, pero resulta que existen planetas con una *habitabilidad primaria* aún mayor, medida en términos de aptitud para albergar organismos autótrofos capaces de sintetizar por sí mismos todo lo que necesitan. En este ranquin, los mejor situados según la información de la que disponemos a día de hoy son K2-18 b, Kepler-62 e y Gliese 832 c. Esto puede resultar sorprendente teniendo en cuenta que la única vida que conocemos es la terrestre y que las condiciones de habitabilidad son extrapolaciones de las de nuestro planeta. La paradoja que supone que existan planetas con mayor habitabilidad primaria que la Tierra viene dada por el hecho de que se supone que en ellos existen mayores superficies con las condiciones que en nuestro planeta se juzgan como óptimas. Uno de los requisitos más fuertes que se exige a un planeta para ser considerado habitable es que esté a una distancia de su estrella que permita la existencia en su superficie de agua en estado líquido. Se dice de los planetas que cumplen esta característica que están en la *zona de habitabilidad* de su estrella.

Es preciso remarcar que, aunque se han encontrado miles de planetas, esto no es un porcentaje significativo del total. En el caso de los planetas terrestres esto resulta especialmente difícil ya que hasta ahora se ha dependido del método del tránsito. Esto implica que tan solo se han podido detectar aquellos cuyas órbitas cortan la visual con sus estrellas, lo que representa una pequeñísima parte del total. Para el resto se necesitaría disponer de instrumentos de observación muchísimo más potentes para poder detectarlos directamente, lo cual resulta imposible a día de hoy debido a la gran luminosidad de sus estrellas. De hecho, las pocas observaciones directas que se han realizado hasta el momento son de planetas extrasolares de dimensiones comparables a la de Júpiter. Sin embargo, el constante desarrollo de las técnicas de observación espacial puede posibilitar en las próximas décadas la

obtención de imágenes de planetas extrasolares que permitan el conocimiento de sus propiedades, como la composición de sus posibles atmósferas. Con estos datos se podrá intentar detectar indicios de vida primitiva, como por ejemplo un alto nivel de oxígeno atmosférico. Para hacernos una idea de la dificultad que supone encontrar planetas con la tecnología actual, tan solo hace falta recordar que hasta 2016 ni siquiera éramos conscientes de que Próxima Centauri, la estrella más próxima a la Tierra, contaba con uno. Otros planetas extrasolares destacados encontrados recientemente son los que forman el sistema Trappist-1, situado a aproximadamente 40 años-luz de nosotros.

El número de planetas en la Vía Láctea se estima entre cien y cuatrocientos mil millones. Para obtener este intervalo se ha aplicado el análisis estadístico a la observación del universo. Concretamente, se han examinado de forma automática imágenes obtenidas sistemáticamente para detectar anomalías provocadas por cuerpos situados entre las fuentes lumínicas y nosotros. Estas anomalías pueden consistir tanto en variaciones regulares de la luminosidad de las estrellas debidas a los tránsitos de sus propios planetas como en variaciones puntuales de la luminosidad de fuentes lejanas debidas a *microlensing*, es decir, a la desviación de sus rayos de luz por el tránsito de un objeto masivo lejano. Los datos considerados en la actualidad indican que cada estrella tendría orbitando a su alrededor aproximadamente un planeta de media y existiría además una cantidad similar de cuerpos planetarios interestelares. Esta nomenclatura encierra una cierta contradicción, ya que la actual definición de planeta implica que tiene que orbitar a una estrella, pero es la que se usa de momento. En cualquier caso, se cree que se habrían formado vinculados a estrellas antes de ser expulsados al espacio interestelar. En cuanto a los sistemas planetarios, los datos recopilados por la sonda Kepler han servido

Podría haber extraterrestres en nuestra galaxia, y existen miles de millones de otras galaxias. La probabilidad indica que es casi seguro que haya vida en algún otro lugar del espacio.

**BUZZ ALDRIN**



y siguen sirviendo de base para las estimaciones más precisas. Las más actuales indican que el número de planetas de tamaño similar a la Tierra orbitando en torno a la zona habitable de sus estrellas podría alcanzar los cuarenta mil millones, aproximadamente una cuarta parte de los cuales lo haría alrededor de estrellas similares al Sol. Estas cifras sugieren que la vida podría ser mucho más frecuente de lo que se había creído con anterioridad, sin embargo, las esperanzas de encontrarla fuera de la Tierra siguen siendo de momento bajas debido a las inmensas distancias interestelares.

Finalmente, el proyecto SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) analiza los datos recogidos por grandes radiotelescopios en busca de pautas artificiales que indiquen posibles emisiones enviadas por vida inteligente. Para esa titánica tarea se están utilizando superordenadores y computación distribuida en todo el mundo, aunque ninguna señal extraterrestre inequívoca ha podido ser captada hasta el momento. Nótese que la dificultad de encontrar una posible señal es elevadísima, ya que habitualmente ni siquiera somos capaces de detectar planetas enteros. Sin embargo, a tan solo 50 años-luz de nosotros existen unas dos mil estrellas con cuyas posibles civilizaciones podríamos aspirar a contactar, aunque la comunicación no resultaría nada sencilla en caso de conseguirlo. Los posibles planetas más cercanos con características similares a la Tierra actualmente identificados pero no confirmados se hallarían en Tau Ceti, a unos 12 años-luz de nosotros. Se trata de una estrella similar al Sol en masa y tipo espectral, situada en la constelación de Cetus. Analizando estadísticamente las variaciones en su velocidad radial, se han detectado indicios de cinco posibles planetas a su alrededor. Los dos más lejanos, Tau Ceti e y Tau Ceti f, estarían orbitando en la zona de habitabilidad de la estrella con unos tamaños comparables al de la Tierra. En el caso de que alguno de ellos albergara una civilización con la que pudiéramos llegar a comunicarnos mediante señales electromagnéticas, tardaríamos 24 años en recibir una respuesta a cada mensaje que enviáramos.

Las galaxias del universo poseen pues cientos o miles de millones de estrellas, a su vez dotadas quizá de un número grande

de planetas, muchos de los cuales podrían reunir las condiciones para albergar vida. De nuestro estudio de todas esas estrellas y galaxias, en particular de las más próximas, se derivarán en el futuro estimaciones mucho más precisas y, quién sabe, el posible descubrimiento de señales de la existencia de otros seres vivos en el universo.



## LECTURAS RECOMENDADAS

---

- ASIMOV, I., *Soles en explosión*, Buenos Aires, Sudamericana Planeta, 1986.
- BACHILLER, R., *Astronomía*, Barcelona, Lunwerg, 2009.
- DULTZIN, D., *Cuásares en los confines del universo*, Madrid, FCE, 2008.
- GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia*, Barcelona, Crítica, 2004.
- MOLES, M., *El jardín de las galaxias*, Madrid, CSIC, 2009.
- RIDPATH, I., *Diccionario de astronomía*, Madrid, Oxford-Complutense, 2009.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- TAYLOR, S.R., *Nuestro sistema solar y su lugar en el cosmos*, Madrid, Cambridge University Press, 2003.
- VV.AA., *Astrobiología: Un puente entre el Big Bang y la vida*, Madrid, Akal, 2009.
- VEGUIN, V., *La Vía Láctea*, Bohodón, Madrid, 2016.



## ÍNDICE

---

- agujero negro 11, 56, 64, 93, 95,  
100, 105, 108, 110, 114, 124,  
134, 135
- año-luz 11, 12, 34, 39, 41, 54, 55,  
57, 61, 65, 68, 70, 72, 73, 75, 87,  
91, 92, 97, 104, 106, 113, 114,  
118, 119, 123, 125, 127-129,  
134, 135, 137-140, 143-145, 147,  
148
- ascensión recta 31, 32, 73, 133
- blazar 11, 80, 107, 110
- brazo espiral 10-12, 81, 84, 86, 95,  
99-102, 123, 124, 129, 132, 134,  
136-138
- brote estelar 11, 65, 79, 106-108,  
110, 112
- campo  
gravitatorio 52, 93  
magnético 25, 132, 135
- canibalismo galáctico 80, 91, 108
- carga eléctrica 132
- colisión galáctica 65, 80, 108
- cúmulo estelar 42, 64, 65, 114, 135  
abierto 10, 61, 64, 88, 98, 124,  
137, 140  
globular 11, 61, 64, 89, 91, 98,  
104, 119, 124, 127, 139, 140
- declinación 31, 32, 73, 112, 113,  
118, 119, 133
- diagrama de Hertzsprung-Russell  
35, 82, 83
- disco galáctico 11, 63, 118, 128,  
134, 138
- eclíptica 28, 32, 33, 39, 40, 73
- ecuador 31-33
- efecto Doppler 7, 67, 71, 142
- eje de rotación 18, 19, 21, 25, 28,  
30, 32, 73
- espacio-tiempo 47, 49-54, 56, 66,  
93



espectro electromagnético 7, 8,  
35, 38, 42, 51, 67, 71, 82, 87, 95,  
100, 106, 107, 110, 112

estrella 8, 10-12, 17-19, 24, 25,  
28-31, 34-36, 38, 40-42, 48, 53-  
57, 61-66, 70-72, 74, 79, 82, 83,  
86-92, 94-96, 98-100, 102, 104-  
108, 110, 112, 113, 118, 121,  
123, 124, 126-129, 132-149

fusión galáctica 9, 48, 60, 64, 80,  
91, 92, 94, 99, 102, 108, 112,  
113, 118, 119, 125, 138, 140

galaxia  
central dominante 87, 88, 91,  
118  
elíptica 10, 11, 35, 79, 81, 84,  
86-92, 94, 95, 98, 99, 101-  
104, 113, 119  
enana 11, 86, 89-91, 104, 106,  
113, 118, 128, 138, 140  
enana casi esférica 11, 86, 89,  
128  
enana ultracompacta 106  
espiral 7, 10, 11, 35, 72, 79, 81,  
84, 86-88, 91, 93-96, 98, 100-  
102, 104, 106, 110, 113, 115,  
118, 123, 132, 134, 136  
espiral barrada 10, 11, 79, 81,  
84, 86, 95, 100-102, 124, 125,  
132  
infrarroja extremadamente  
luminosa 11, 87, 112  
infrarroja luminosa 112  
infrarroja ultraluminosa  
112  
irregular 10, 61, 79, 81, 84, 86,  
87, 101, 104, 108, 115, 118  
satélite 12, 91, 119, 125  
Seifert 11, 80, 107

supergigante elíptica 86, 89  
ultradifusa 106

Gran nube de Magallanes 111,  
114

halo galáctico 12, 91, 92, 95, 98,  
124, 128, 129, 134, 138-141

latitud 28, 31, 33, 73, 113, 114,  
133

galáctica 133

línea 107, 110, 112

longitud 28, 31, 133

galáctica 133

luz 9, 19, 21, 22, 29, 34, 39, 45, 49,  
50, 52-54, 65, 67, 68, 71, 72, 93,  
94, 96, 110, 119, 134, 142, 147

M31 (galaxia de Andrómeda) 7,  
9, 42, 70, 72, 80, 92, 94, 98, 106,  
109, 112, 113, 125, 138

M33 (galaxia del Triángulo) 72,  
113, 125

M51 (galaxia del Remolino) 114,  
115, 118

M60-UCD1 106

M64 (galaxia del Ojo Negro) 114,  
115, 118

M81 (galaxia de Bode) 98, 108

M82 (galaxia del Cigarro) 29, 108

M83 (galaxia del Molinillo  
Austral) 100

M85 102, 103

M87 91, 92, 119

meridiano 32

momento angular 10, 88

núcleo galáctico 112, 137

onda  
electromagnética 17, 22, 47,  
54, 66, 67

gravitatoria 66, 93, 95

de radio 134, 142

órbita 21, 24, 25, 28, 32, 52, 60,  
61, 72, 74, 99, 100, 125, 129,  
132, 138, 140, 145, 146

paralelo 32

Pequeña nube de Magallanes  
111, 114

plano

ecuatorial 30, 32, 73, 125

galáctico 41, 72, 73, 75, 125,  
128, 129, 133, 135

orbital 28, 30, 72, 73, 140, 142

población estelar I 64

población estelar II 64

polo de rotación 21, 31-33, 36,  
73, 114, 133

quásar 11, 80, 107, 108, 110

radiación

de microondas 25, 51, 54, 62,  
65, 71

electromagnética 7, 54, 56, 60,  
65, 80, 95-97, 105, 108, 110,  
134, 135

infrarroja 24, 112

ultravioleta 24

radiotelescopio 13, 22, 23, 96, 148

ratio de formación de estrellas  
10, 11, 79, 88, 95, 98, 101, 102,  
106-108, 110

rayos

gamma 24, 135

X 24, 29, 94, 107, 110, 135, 140

relación

de Faber-Jackson 35

de Tully-Fisher 35

relatividad 17, 21, 50-52, 93, 97

satélite 19, 25, 41, 55, 61, 141

sistema

de coordenadas 31-33, 133

de referencia 10, 18, 28, 30-33,  
52, 73-75

de referencia anclado a la  
Tierra 28

de referencia galáctico 133,  
134

de referencia inercial 30

telescopio 8, 9, 19, 22, 24, 26, 29,  
42, 48, 60, 61, 68, 70, 77, 80, 96,  
97, 105, 112, 114, 119-121, 126,  
134, 140, 145

tipo espectral 35, 82, 83, 86, 148

velocidad 7, 9, 11, 20, 21, 35, 38,  
39, 45, 50-52, 54, 67, 71, 75, 93,  
94, 96, 98, 100, 107, 110, 114,  
119, 129, 132, 137, 140, 142,  
148